This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

**Usage guidelines**

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

**About Google Book Search**

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

**A propos de ce livre**

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

**Consignes d'utilisation**

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

**À propos du service Google Recherche de Livres**

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
*of the Harvard College Library*

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

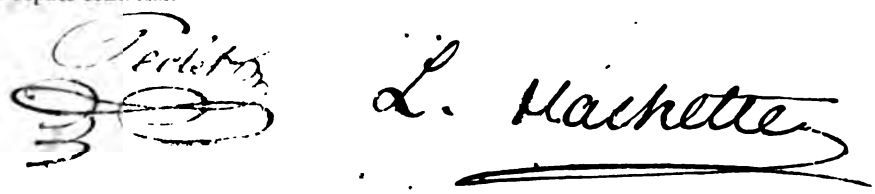
Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.

# TRAITÉ
# DE LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

## DANS SES APPLICATIONS

Tout exemplaire qui ne sera pas revêtu de la griffe de l'auteur et de celle de l'éditeur sera réputé contrefait.



Paris.—Typographie de Firmin Didot frères, rue Jacob, 56.

# TRAITÉ

# DE LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

## DANS SES APPLICATIONS

(Jean Claude) Eugène

**PAR E. PÉCLET**

INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'UNIVERSITÉ, PROFESSEUR DE PHYSIQUE APPLIQUÉE AUX ARTS, A L'ÉCOLE CENTRALE
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ PHILOMATHIQUE, DU CONSEIL DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT, ETC

DEUXIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFONDUE

---

Tome Premier

---

PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE

RUE PIERRE-SARRAZIN, 12

1843

Eng 2698.43
~~Eng 2608.43~~
HARVARD COLLEGE LIBRARY

[illegible]

[illegible]

[illegible] 8/16.25

# PRÉFACE.

Ce Traité de la chaleur n'est ni un livre purement théorique ni un simple recueil de descriptions d'appareils. Pour tous les modes d'emploi de la chaleur, j'ai toujours examiné les conditions à remplir, les avantages et les inconvénients de chaque système, et j'ai cherché à déduire d'expériences faites en grand ou dans des circonstances convenables, des formules ou des règles d'une application facile, qui puissent servir de guide aux constructeurs; mais souvent, par la complication des phénomènes et le manque de données suffisamment précises, j'ai dû me borner à de simples indications.

Cet ouvrage, résumé d'une partie du cours dont je suis chargé à l'École centrale, depuis sa fondation, diffère beaucoup de la première édition de mon Traité de la chaleur, non-seulement par la distribution des matières, par le nombre et la nature des planches, mais surtout par les nombreuses additions que réclamaient les progrès de l'industrie. Aussi ce livre doit être considéré plutôt comme un ouvrage nouveau que comme une réimpression.

Les tables des matières placées à la fin de chaque volume font connaître l'ordre que j'ai suivi. J'ai réuni, dans un premier chapitre, les principaux faits physiques auxquels on a recours à

chaque instant dans les applications. J'ai ensuite examiné successivement les combustibles, les mouvements de l'air produits par la compression et par la chaleur, les cheminées, les foyers, et la transmission de la chaleur. Là se terminent les considérations qui précèdent les différents modes d'emploi de la chaleur.

J'ai passé en revue les appareils de vaporisation, d'évaporation et de séchage, ainsi que ceux qui sont destinés au chauffage de l'air, des liquides et des solides.

Un chapitre est consacré à l'exposé des lois du refroidissement, et renferme les résultats des expériences que j'ai faites sur la transmission de la chaleur à travers les corps mauvais conducteurs, principalement ceux qu'on emploie dans les constructions.

Enfin, dans le dernier chapitre, qui traite de l'assainissement des lieux habités, j'ai posé les principes sur lesquels doivent se baser tous les systèmes de chauffage et de ventilation.

Malgré un grand nombre de recherches particulières et les renseignements qui m'ont été fournis par plusieurs ingénieurs distingués, cet ouvrage renferme encore quelques lacunes; mais elles tiennent à des questions que l'état de la science ne permet pas de résoudre (1).

---

(1) Dans la correction des épreuves du texte et des planches, ainsi que dans la vérification des calculs, j'ai été très-bien secondé par M. Thauvin, ancien élève de l'École centrale.

# ERRATA DU PREMIER VOLUME.

| Pages. | Lignes. | Au lieu de : | Lisez : |
|---|---|---|---|
| 14 | 4 | la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive | la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur à 0°. |
| 17 | 30 | $V' = \frac{Vp}{p'}\left(\frac{1+0{,}00364\,t}{1+0{,}00364\,t'}\right)$ | $V' = \frac{Vp}{p'}\left(\frac{1+0{,}00364\,t'}{1+0{,}00364\,t}\right)$ |
| 35 | 18 | Alcool.... 79,7 | Alcool.... 78,4 |
| 45 | 1 | Et par suite qu'on | Et par suite on |
| *id.* | 27 | produites | produits |
| 48 | 10 | (57) | (56) |
| 123 | 21 | 88 kilogrammes | 88 parties |
| 136 | 3 | $v = 29\sqrt{\frac{PD^5}{L+42\frac{D^5}{d^4}}}$ | $v = 29\,\frac{1}{d^2}\sqrt{\frac{PD^5}{L+42\frac{D^5}{d^4}}}$ |
| *id.* | 6 | $v = 29\sqrt{\frac{PD^5}{L+42D}}$ | $v = 29\sqrt{\frac{PD}{L+42D}}$ |
| *id.* | 9 | $v = 26{,}44\sqrt{\frac{PD^5}{L+54D}}$ | $v = 26{,}44\sqrt{\frac{PD}{L+54D}}$ |
| 146 | 30 | $P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D}v^2 + \frac{KL'}{D\delta}v^2$ | $P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D}v^2 + \frac{KL'}{D\delta^2}v^2$ |
| 155 | 18 | $v$ | $v^2$ |
| 176 | 18.20.22 et 30 | 441,45 | 429,67 |
| *id.* | 22 | D = 0,98 | D = 0,29 |
| 177 | 6 | 6,18 | 5,18 |
| 219 | 25 | $p\left(\frac{V-v}{29}\right)^2$ | $p\frac{(V-v)^2}{2g}$ |
| *id.* | 26 | $2Vv : 2g$ | $2pVv : 2g$ |
| *id.* | 31 | La différence entre la vitesse absolue | La différence entre les carrés des vitesses absolues |
| *id.* | 33 | $2Vv : 2g$ | $2Vv$ |
| 328 | 16 | baromètre | manomètre |
| 336 | 5 | fig. 9 et 10 (pl. 9) | fig. 9 et 10 (pl. 19) |

# ERRATA DU SECOND VOLUME.

| Pages. | Lignes. | Au lieu de : | Lisez : |
|---|---|---|---|
| 4 | 22 | 20$^{m}$,492 | 20$^{m}$,98 |
| 14 | 24 | 50 | 59 |
| 53 | 15 | (403) | (404) |
| 64 | 17 | (705) | (703) |
| 88 | 29 | l'alimentation de la chaudière à vapeur | l'alimentation des chaudières de concentration |
| 121 | 15 | Les figures 4, 5, 6 et 7 | Les figures 4, 5, 6 et 7 (pl. 61) |
| 132 | 34 | Diamètre inférieur | Diamètre intérieur |
| 152 | 6 | figures 2 et 3 (pl. 66) | figures 2 et 3 (pl. 67) |
| 155 | 16 | tringles de fer fixés | tringles de fer fixées |
| 355 | 22 | Coton très-divisé.... 0,035 | Coton très-divisé.... 0,054 |
| 364 | 22 | du liquide | de l'eau |
| *id.* | 21 | l'eau | l'air. |

# TRAITÉ

# DE LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

## DANS SES APPLICATIONS.

## CHAPITRE PREMIER.

### PRINCIPAUX FAITS RELATIFS A LA THÉORIE PHYSIQUE DE LA CHALEUR.

### § 1. — TEMPÉRATURE. THERMOMÈTRES.

1. Dans ce résumé, nous énoncerons les faits observés, nous rapporterons les lois relatives à ces faits, et cela sans aucune démonstration; nous renvoyons, pour ce dernier objet, aux traités élémentaires de physique.

2. Lorsqu'un corps s'échauffe, on dit que sa température augmente, qu'elle baisse quand il se refroidit, et que les corps ont la même température lorsque, par leur contact, leur état de chaleur ne change pas, quoiqu'ils puissent alors produire sur nos organes des effets fort différents. On est convenu de mesurer la température par les variations de volume des corps, qui accompagnent toujours les variations de température; et, comme la température de la glace fondante et celle de l'ébullition de l'eau sous la pression de $0^m,76$ sont constantes, on est convenu de prendre pour degré de température l'accroissement de chaleur correspondant à un accroissement de volume du corps thermométrique égal à $\frac{1}{100}$ de l'accroissement de volume qu'il éprouve en passant de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition de l'eau, sous la

pression de $0^m,76$. Mais comme tous les corps ne se dilatent pas de la même manière, une même température intermédiaire à celles de la glace fondante et de l'ébullition serait représentée par des nombres différents, lorsqu'on employerait différentes substances thermométriques. On a donc été obligé de convenir aussi de la nature du corps thermométrique. On a choisi les gaz, attendu que tous se dilatant de la même manière, les effets de la chaleur dans ces corps sont indépendants de leur nature, et doivent être plus simples que quand les corps sont à l'état liquide ou solide. Mais comme le mercure se dilate de la même manière que les gaz dans des limites très-étendues, on peut employer indifféremment l'air ou le mercure. On emploie aussi l'alcool comme substance thermométrique; mais comme la dilatation de cette substance est très-irrégulière, du moins par rapport à celle du mercure, on gradue ces instruments en déterminant un grand nombre de points de l'échelle par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure.

3. On emploie trois échelles thermométriques différentes : l'échelle centigrade, qui renferme 100 divisions, de la glace fondante à l'ébullition de l'eau; le thermomètre de Réaumur, qui en contient 80; enfin, celle de Farenheit, qui marque 32° pour la température de la glace fondante et 212 pour celle de l'ébullition. En désignant par C, R et F les indications de ces trois échelles dans la même circonstance, on a évidemment

$$C = \frac{5}{4}R \quad \text{et} \quad C = (F - 32)\frac{5}{9}.$$

4. Comme il est impossible de se procurer des tubes capillaires parfaitement cylindriques, lorsqu'on veut faire des observations très-exactes, on emploie des tubes divisés en parties d'égale capacité; on note les indications de l'échelle arbitraire qui correspondent aux températures de la glace fondante et de l'ébullition, et on déduit facilement de ces nombres la température qui correspond à une indication quelconque de l'échelle. Dans toutes les recherches de précision, on vérifie souvent l'indication qui correspond à la glace fondante, attendu qu'elle change, du moins pendant un certain temps, par un travail intérieur du verre.

5. Les thermomètres à air sont formés, comme les thermomètres à mercure, d'un tube très-capillaire, terminé par un réservoir; mais le tube est ouvert à la partie supérieure, et le réservoir ainsi qu'une partie de la tige contiennent de l'air sec, séparé de l'air extérieur par une

bulle de mercure. La tige est divisée en parties d'égale capacité, dont le volume est une fraction connue de celui du réservoir. En désignant par V et V′ les volumes de l'air de l'instrument à la température de la glace fondante et à la température T que l'on veut déterminer, par P et P′ les pressions de l'atmosphère dans ces deux circonstances, et par $a$ le coefficient de dilatation de l'air, on a

$$T = \frac{P'V' - PV}{aPV}.$$

Dans cette formule on a négligé la dilatation du verre, parce qu'elle est 150 fois plus petite que celle de l'air.

6. Il y a dans les thermomètres deux espèces de sensibilité : celle qui fait apprécier de très-petites variations de température, et celle qui permet à ces instruments de se mettre très-promptement en équilibre de température avec le milieu environnant. Pour obtenir la première espèce de sensibilité, il faut donner aux tiges des thermomètres un très-petit diamètre, et aux réservoirs une grande capacité. La dernière exige au contraire que la masse thermométrique soit très-petite. Ainsi, on ne peut pas réunir dans un même instrument ces deux espèces de sensibilité à un très-haut degré.

7. Lorsqu'il s'agit de mesurer de petites différences de température, on emploie des appareils qui sont composés de deux boules de verre, fixées aux extrémités d'un tube de verre capillaire recourbé sous la forme d'un U. La partie inférieure renferme une bulle d'alcool coloré, ou une longue colonne de ce liquide, qui sépare complétement l'air d'une des boules de celui que renferme l'autre. On conçoit que la plus petite différence de température des deux boules sera manifestée par un mouvement du liquide intermédiaire.

8. *Thermomètres à maxima et à minima.* Ces instruments sont destinés à conserver la trace du maximum ou du minimum de température dans un certain laps de temps. Les plus simples sont disposés comme les thermomètres ordinaires, mais ils sont placés horizontalement; ceux qui sont destinés à indiquer les maxima sont à mercure et renferment un petit cylindre d'acier que le mercure pousse devant lui quand la température s'élève, et qu'il abandonne quand elle baisse; ceux qui doivent indiquer les minima sont à alcool, et leur tige renferme un petit

index en émail que le liquide entraîne quand la température baisse, et qu'il abandonne dans sa position quand la température s'élève.

9. *Thermomètres métalliques.* Tous les instruments dont nous venons de parler sont fondés sur la différence de dilatation des liquides et du verre ; on emploie aussi des instruments fondés sur l'inégale dilatation des métaux. Ces appareils sont formés de deux barres de métaux différents, d'inégale longueur, appliquées l'une contre l'autre et fixées par une de leurs extrémités; l'extrémité libre de la plus courte coïncide avec des points de l'autre, variables avec la température. On peut graduer ces appareils comme les thermomètres à mercure, mais les divisions sont très-rapprochées. On augmente ordinairement la dilatation apparente à l'aide d'un ou plusieurs leviers. Ces appareils sont rarement employés.

10. *Mesure des hautes températures.* Les instruments destinés à la mesure des hautes températures portent le nom de *pyromètres*. Le plus généralement employé est celui de Vedgwood. Il est fondé sur le retrait qu'éprouve l'argile soumise à l'action de la chaleur : ce retrait croît avec la température, mais suivant une loi inconnue et qui varie avec la nature de l'argile; il est dû, jusqu'à une certaine limite, à l'eau que cette matière abandonne ; mais au delà il paraît provenir uniquement d'une plus forte agglomération de la matière. Le pyromètre de Vedgwood est composé d'une plaque de cuivre sur laquelle sont fixées deux règles de même métal inclinées entre elles, et entre lesquelles se placent de petits cônes tronqués en argile qui s'élèvent d'autant plus qu'ils ont éprouvé un plus grand retrait. Les cônes doivent être faits avec la même pâte renfermant la même quantité d'eau, et être recuits à la même température ; Vedgwood a adopté le rouge naissant, et a marqué zéro au point où les cônes s'arrêtent : au delà, 240 divisions sont tracées sur une des règles. Pour reconnaître la température d'un fourneau, on y introduit un des petits cônes d'argile placé dans un creuset; on le retire quand il en a pris la température, on le laisse refroidir et on le place entre les deux règles en le faisant glisser jusqu'au point le plus élevé qu'il puisse atteindre. Le degré de l'échelle auquel il parvient indique la température. Dans le pyromètre de Vedgwood, le zéro correspond à 580° du thermomètre centigrade, et chaque division a 72°. Ces instruments sont surtout utiles pour reconnaître des variations de température ; ils ne sont employés que dans les fourneaux à poteries.

11. La température de la fusion des corps étant constante, on conçoit que ce phénomène puisse servir à reconnaître si la température d'un foyer a été au-dessus ou au-dessous de certaines limites; et si on pouvait se procurer des corps dont la fusibilité se manifestât à des températures croissantes et peu éloignées, on parviendrait ainsi à trouver la température d'un corps avec une approximation d'autant plus grande que les températures de fusion des corps employés seraient plus voisines. Ainsi, par exemple, si on plaçait dans un foyer de chaleur, de l'étain, du plomb et du zinc, dans trois vases séparés, ces trois métaux fondant à 210°, 260° et 360°, si l'étain seul entrait en fusion, la température du foyer serait comprise entre 210° et 260°. Mais les métaux simples fondent à des températures trop différentes pour que leur fusion donne des indications suffisamment approchées. M. J. Prinsep a imaginé d'employer des alliages d'argent et d'or, ou d'or et de platine, à différents titres, qui, embrassant toutes les températures comprises entre celles de la fusion de l'argent et du platine, et pouvant être aussi nombreux qu'on le veut, permettent d'assigner exactement la nature de l'alliage fusible à une température déterminée. M. Prinsep forme avec l'or et l'argent dix alliages seulement, renfermant des quantités croissantes d'or de $\frac{1}{10}$; et cent alliages avec l'or et le platine, dans lesquels ce dernier métal augmente successivement de $\frac{1}{100}$. Pour observer la température d'un foyer, on y place une coupelle d'os calcinés, renfermant un certain nombre de cavités numérotées, dans chacune desquelles on place un fragment d'alliage de la grosseur d'une tête d'épingle; quand la coupelle a pris la température du foyer, on la retire et on observe à quel alliage la fusion s'est arrêtée. Ce physicien désigne cet alliage par les deux lettres initiales des métaux alliés, et fait précéder l'une d'elles du chiffre indiquant la proportion dans laquelle il entre dans l'alliage. Ainsi, par exemple, si l'alliage le plus réfractaire fondu était formé de neuf parties d'argent et d'une d'or, il le désignerait par A. 0,1 O. Cette méthode est très-commode pour reconnaître si la température d'un foyer est plus basse ou plus élevée que celle d'un autre foyer; mais, pour qu'elle en donnât une évaluation exacte, du moins pour que celle-ci fût comparable à celle qui serait donnée par un thermomètre ordinaire, il faudrait connaître la température de la fusion de chaque alliage en degrés du thermomètre à air. M. Prinsep a fait cette détermination pour la fusion

de l'argent et de plusieurs alliages d'or, par la mesure de la dilatation de l'air renfermé dans un vase d'or. Voici le résultat de ces expériences :

| | |
|---|---|
| Chaleur rouge..... | 649° cent. |
| Chaleur orange..... | 899 |
| Fusion de l'argent..... | 999 |
| Argent avec $\frac{1}{10}$ d'or..... | 1048 |
| Argent avec $\frac{1}{4}$ d'or..... | 1121 |

12. Lorsqu'on plonge un corps chaud dans de l'eau, la température que prend le liquide dépend à la fois des températures primitives des deux corps et de leurs chaleurs spécifiques ; alors si on connaît la température finale de l'eau et trois des autres quantités, on peut calculer la quatrième. C'est ainsi qu'on détermine la chaleur spécifique des corps. Cette méthode peut aussi être employée pour déterminer la température d'un fourneau. Supposons qu'on introduise dans un fourneau un morceau de fer dont le poids soit P, qu'on l'en retire lorsqu'il en a pris la température, et qu'on le plonge dans un vase renfermant un poids P′ d'eau à la température $t$, et supposons que la température de ce liquide s'élève à $t'$; en désignant par $x$ celle du fourneau, et par $c$ la chaleur spécifique du fer, on aura évidemment

$$Pc(x-t')=P'(t'-t) \quad \text{d'où} \quad x=\frac{P'(t'-t)}{Pc}+t'.$$

Cette méthode pourrait conduire à des résultats très-exacts si la chaleur spécifique du fer était constante; mais comme elle varie avec la température, on ne peut obtenir ainsi qu'une approximation assez grossière. Cependant, avec un peu de soin, on peut déterminer la température d'un fourneau à moins de 0,1, et cette approximation est presque toujours suffisante.

13. On peut enfin obtenir la température d'un fourneau par les courants thermo-électriques. Si on fixe au fond d'un canon de fusil un fil de platine dirigé suivant son axe et communiquant avec une des extrémités du fil d'un rhéomètre, et à l'autre bout du tube un autre fil de platine communiquant avec l'autre extrémité du fil du rhéomètre, et si on place dans un fourneau la première extrémité du canon de fusil,

en maintenant à la même température toutes les autres soudures, l'aiguille du rhéomètre éprouvera des déviations qui croîtront avec la température du fourneau, et celle-ci pourra se mesurer, en admettant que l'intensité du courant est proportionnelle à la différence des températures des deux soudures fer et platine, comme cela a été reconnu pour des différences de température comprises entre des limites assez étendues.

## § 2. — CALORIQUE RAYONNANT.

14. Tous les corps, quelles que soient d'ailleurs leur nature et leur température, émettent de la chaleur qui se transmet comme la lumière, et qui porte le nom de calorique rayonnant.

15. Le calorique rayonnant se meut en ligne droite avec une très-grande vitesse, comparable à celle de la lumière.

16. Les rayons de chaleur se réfléchissent à la surface des corps polis; les rayons incidents et réfléchis sont dans un même plan normal à la surface au point d'incidence, et les deux rayons sont également inclinés sur la normale. Il résulte de là que les rayons de chaleur se comportent avec les miroirs comme les rayons de lumière.

17. L'intensité du calorique rayonnant varie en raison inverse du carré de la distance à la source de chaleur. C'est une conséquence nécessaire de la divergence des rayons à leur origine.

18. Les corps réfléchissent d'autant mieux la chaleur qu'ils sont mieux polis; mais la nature des corps a aussi une grande influence.

*Tableau des pouvoirs réflecteurs des corps, d'après Leslie.*

| | |
|---|---|
| Cuivre jaune | 100 |
| Argent | 90 |
| Étain en feuilles | 80 |
| Acier | 70 |
| Plomb | 60 |
| Étain mouillé de mercure | 10 |
| Verre | 10 |
| Verre huilé | 5 |
| Noir de fumée | 0 |

D'après M. Melloni, les différents liquides, la faïence, les émaux et les marbres ont un pouvoir réflecteur qui diffère peu de celui de l'eau.

19. *Pouvoir émissif.* L'intensité des faisceaux de chaleur de même section est constante, quelle que soit leur inclinaison sur la surface du corps rayonnant; d'où il résulte que les faisceaux de chaleur émis par une même étendue de la surface d'un corps, ont des intensités proportionnelles au sinus de l'angle formé par la direction des rayons avec cette surface.

*Tableau des pouvoirs émissifs d'un certain nombre de corps; d'après Leslie.*

| | |
|---|---|
| Noir de fumée | 100 |
| Eau | 100 |
| Papier à écrire | 98 |
| Verre ordinaire | 90 |
| Encre de Chine | 88 |
| Glace | 85 |
| Mercure | 20 |
| Plomb brillant | 19 |
| Fer poli | 15 |
| Étain, argent, or | 12 |

*D'après M. Melloni.*

| | |
|---|---|
| Noir de fumée | 100 |
| Carbonate de plomb | 100 |
| Colle de poisson | 91 |
| Encre de Chine | 85 |
| Gomme laque | 72 |
| Surface métallique | 12 |

20. Pour les métaux, l'état de la surface a une grande influence sur le pouvoir émissif; celui-ci est beaucoup plus grand quand les surfaces sont ternes que quand elles sont polies. Pour les corps non métalliques, le pouvoir émissif paraît être indépendant de l'état de la surface.

21. *Pouvoir absorbant.* Le pouvoir absorbant des corps varie dans le même sens que le pouvoir émissif, mais il change avec la nature de la source de chaleur.

M. Melloni, en faisant tomber des rayons de même intensité, mais partis de sources différentes, sur différents corps, a obtenu les résultats suivants :

| | LAMPE. | PLATINE INCANDESCENT. | CUIVRE A 400°. | CUIVRE A 100°. |
|---|---|---|---|---|
| Noir de fumée..... | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Carbonate de plomb..... | 53 | 56 | 89 | 100 |
| Colle de poisson..... | 52 | 54 | 64 | 91 |
| Encre de Chine..... | 96 | 95 | 87 | 85 |
| Gomme laque..... | 43 | 47 | 70 | 72 |
| Surface métallique..... | 14 | 13,5 | 13 | 13 |

21 *bis*. On admet que les pouvoirs émissifs et absorbants sont égaux.

22. *Transmission du calorique rayonnant à travers les corps solides et liquides transparents*. Les rayons de chaleur traversent les corps diaphanes comme la lumière ; à ce fait connu depuis longtemps, M. Melloni a ajouté récemment un grand nombre de faits nouveaux ; nous signalerons ceux qui peuvent avoir de l'importance dans le sujet qui nous occupe.

23. Les quantités de chaleur qui traversent les corps *diathermanes* (c'est ainsi que M. Melloni désigne ceux qui peuvent être traversés par la chaleur rayonnante) sont d'autant plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs, que le poli de leur surface est plus grand.

24. La quantité de chaleur qui traverse des plaques de nature différente, mais de même épaisseur, est très-variable et n'a point de rapport avec leur degré de transparence, ni avec leur teinte. De tous les corps diathermanes, le sel gemme est celui qui laisse passer le plus de chaleur, l'alun celui qui en laisse passer le moins.

25. La quantité de chaleur qui traverse une plaque diathermane diminue à mesure que son épaisseur augmente, mais suivant une loi beaucoup moins rapide. Le sel gemme fait exception : il laisse passer la même quantité de chaleur sous toutes les épaisseurs. Les vitres ordinaires laissent passer à peu près 0,70 des rayons émanés des flammes, 0,45 de ceux qui partent d'un métal incandescent, et 0,07 de ceux qui émanent des corps chauffés au-dessous de la chaleur rouge.

## § 3. — PROPAGATION DE LA CHALEUR A TRAVERS LES CORPS.

26. Lorsqu'une plaque d'une matière homogène a ses deux surfaces maintenues à des températures constantes, la quantité de chaleur qui traverse la plaque est proportionnelle à la différence de température des deux surfaces et en raison inverse de l'épaisseur. Pour des plaques de différentes natures, de même épaisseur et la même différence de température des surfaces, les quantités de chaleur qui les traversent sont proportionnelles aux nombres suivants :

| | |
|---|---|
| Or | 1000 |
| Platine | 981 |
| Argent | 973 |
| Cuivre | 898 |
| Fer | 374 |
| Zinc | 363 |
| Étain | 303 |
| Plomb | 179 |
| Marbre | 23 |
| Porcelaine | 12 |
| Terre cuite | 11 |

27. Les corps les plus mauvais conducteurs sont les substances composées de filaments très-fins qui ne se touchent que par très-peu de points, telles que le coton, la laine, le duvet, le son, la paille, etc.

28. Dans les liquides, la propagation de la chaleur a aussi lieu comme dans les corps solides de molécule à molécule ; mais ce mode d'échauffement ne produit que des effets presque inappréciables. Les liquides s'échauffent principalement par les courants qui se produisent dans leur masse, lorsque la chaleur est appliquée à la partie inférieure des vases qui les renferment.

29. Les gaz n'absorbent qu'une très-petite partie des rayons de chaleur qui les traversent, et ne peuvent s'échauffer, comme les liquides, que par les courants qui en amènent successivement les différentes parties en contact avec des surfaces solides échauffées. Ces mouvements se produisent naturellement quand le foyer de chaleur est placé au-dessous des gaz.

## § 4. — LOIS DU RÉCHAUFFEMENT ET DU REFROIDISSEMENT.

30. Lorqu'un liquide renfermé dans un vase exposé à l'air est à une température plus élevée que le milieu environnant, le liquide se refroidit et par la différence du rayonnement de son enveloppe sur celle de l'enceinte dans laquelle le vase est placé, et par le mouvement de l'air qui l'environne.

En désignant par A la température initiale du liquide, par T sa température après le temps $t$, par $a$ un coefficient constant, et par V la vitesse du refroidissement, c'est-à-dire le refroidissement qui aurait lieu pendant l'unité de temps, pour un excès T de température du corps sur celle du milieu environnant, en supposant que cet excès reste constant, on a les relations

$$\log T = \log A - \frac{at}{2{,}30} ; \quad \text{et} \quad V = aT.$$

Au moyen de la première, on pourra trouver la température T après le temps $t$, lorsque l'on connaîtra la valeur de $a$ qui dépend du poids du liquide, de l'étendue et de la nature de l'enveloppe, et que l'on peut déterminer par une seule expérience. La seconde donne la vitesse du refroidissement lorsqu'on connaît l'excès de la température du corps sur celle de l'air environnant.

Ces formules, qui sont dues à Newton, sont exactes quand la différence des températures du liquide et de l'air ne dépasse pas 20 ou 30° : au delà elles deviennent de plus en plus inexactes; elles sont cependant suffisantes dans un grand nombre de cas.

MM. Petit et Dulong, à la suite d'un travail très-remarquable sur le refroidissement, ont été conduits à une formule beaucoup plus exacte que celle de Newton pour représenter la vitesse du refroidissement en fonction de l'excès de la température du corps sur celle du milieu environnant; mais elle est beaucoup plus compliquée et d'une application très-difficile.

## § 5. — DILATATION DES CORPS.

31. *Dilatation des corps solides.* Le tableau suivant renferme les résultats des expériences faites par plusieurs physiciens. L'unité est le volume du corps à 0°.

*Dilatation linéaire des corps solides, de 0° à 100°.*

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | FRACTIONS DÉCIMALES. | FRACTIONS ORDINAIRES. |
|---|---|---|
| *D'après MM. Laplace et Lavoisier.* | | |
| Flint-glass anglais | 0,00081166 | 1/1248 |
| Platine (selon Borda) | 0,00085655 | 1/1167 |
| Verre de France avec plomb | 0,00087199 | 1/1147 |
| Tube de verre sans plomb | 0,00087572 | 1/1142 |
| *Idem* | 0,00089694 | 1/1115 |
| *Idem* | 0,00089760 | 1/1114 |
| *Idem* | 0,00091750 | 1/1090 |
| Verre de Saint-Gobain | 0,00089089 | 1/1122 |
| Acier non trempé | 0,00107880 | 1/927 |
| *Idem* | 0,00107915 | 1/927 |
| *Idem* | 0,00107960 | 1/926 |
| Acier trempé jaune, recuit à 65° | 0,00123956 | 1/807 |
| Fer doux forgé | 0,00122045 | 1/819 |
| Fer rond passé à la filière | 0,00123504 | 1/812 |
| Or de départ | 0,00146606 | 1/682 |
| Or au titre de Paris, recuit | 0,00151361 | 1/661 |
| *Idem*, non recuit | 0,00155155 | 1/645 |
| Cuivre | 0,00171220 | 1/584 |
| *Idem* | 0,00171733 | 1/582 |
| *Idem* | 0,00172240 | 1/581 |
| Cuivre jaune ou laiton | 0,00186670 | 1/535 |
| *Idem* | 0,00187821 | 1/533 |
| *Idem* | 0,00188970 | 1/529 |
| Argent au titre de Paris | 0,00190868 | 1/524 |
| Argent de coupelle | 0,00190974 | 1/524 |
| Étain des Indes ou de Malaca | 0,00193765 | 1/516 |
| Étain de Falmouth | 0,00217298 | 1/462 |
| Plomb | 0,00284836 | 1/351 |
| *D'après Smeaton.* | | |
| Verre blanc (tubes de baromètre) | 0,00083333 | 1/1175 |
| Régule martial d'antimoine | 0,00108333 | 1/923 |
| Acier | 0,00115000 | 1/870 |
| Acier trempé | 0,00122500 | 1/816 |
| Fer | 0,00125833 | 1/795 |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | FRACTIONS DÉCIMALES. | FRACTIONS ORDINAIRES. |
|---|---|---|
| Bismuth | 0,00139167 | 1/719 |
| Cuivre rouge battu | 0,00170000 | 1/588 |
| Cuivre rouge 8 parties, étain 1 | 0,00181667 | 1/550 |
| Cuivre jaune fondu | 0,00187500 | 1/533 |
| Cuivre jaune 16 parties, étain 1 | 0,00190833 | 1/524 |
| Fil de laiton | 0,00193333 | 1/517 |
| Métal de miroir de télescope | 0,00193333 | 1/517 |
| Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1 | 0,00205833 | 1/486 |
| Étain fin | 0,00228333 | 1/438 |
| Étain en grains | 0,00248333 | 1/403 |
| Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2. | 0,00250533 | 1/399 |
| Zinc, 8 parties, étain 1, un peu forgé. | 0,00269167 | 1/372 |
| Plomb | 0,00286667 | 1/349 |
| Zinc | 0,00294167 | 1/340 |
| Zinc allongé au marteau de 1/12 | 0,00310833 | 1/322 |
| *D'après le major général Roy.* | | |
| Verre en tube | 0,00077550 | 1/1289 |
| Verre en verge solide | 0,00080833 | 1/1237 |
| Fer fondu (prisme de) | 0,00111000 | 1/901 |
| Acier (verge d') | 0,00114450 | 1/874 |
| Cuivre jaune de Hambourg | 0,00185550 | 1/539 |
| Cuivre jaune anglais, en forme de verge. | 0,00189296 | 1/528 |
| Cuivre jaune anglais, en forme d'auge ou canal rectangulaire | 0,00189450 | 1/528 |
| *D'après M. Trougthon.* | | |
| Platine | 0,00099180 | 1/1008 |
| Acier | 0,00118990 | 1/840 |
| Fer tiré à la filière | 0,00144010 | 1/694 |
| Cuivre | 0,00191880 | 1/521 |
| Argent | 0,00208260 | 1/480 |
| *D'après M. Wollaston.* | | |
| Palladium | 0,00100000 | 1/1000 |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | FRACTIONS DÉCIMALES. | FRACTIONS ORDINAIRES. |
|---|---|---|
| *D'après MM. Dulong et Petit.* | | |
| Platine, de 0° à 100..... | 0,00088420 | 1/1161 |
| *Idem.* de 0° à 300..... | 0,00091827 | 1/1089 |
| Verre, de 0° à 100..... | 0,00086133 | 1/1161 |
| *Idem.* de 0° à 200..... | 0,00094836 | 1/1032 |
| *Idem.* de 0° à 300..... | 0,00101084 | 1/987 |
| Fer, de 0° à 100..... | 0,00118210 | 1/846 |
| *Idem.* de 0° à 300..... | 0,00146842 | 1/681 |
| Cuivre. de 0° à 100..... | 0,00171820 | 1/582 |
| *Idem.* de 0° à 300..... | 0,00188324 | 1/531 |

Laplace et Lavoisier ont reconnu que les dilatations d'un même corps étaient uniformes de 0° à 100°, c'est-à-dire que, pour un même nombre de degrés compris dans ces limites, la longueur des barres augmentait d'une même fraction de leur longueur primitive.

Cependant MM. Petit et Dulong ont trouvé que, pour un même nombre de degrés, la dilatation croissait avec la température, comptée sur le thermomètre à air. A la vérité, cet accroissement est presque inappréciable dans les limites de 0° à 100°; mais de 0° à 300° il est assez considérable comme on peut le voir par le tableau précédent.

32. L'accroissement de surface qu'un corps éprouve par son échauffement est sensiblement égal au double de l'accroissement linéaire, et l'accroissement de volume au triple de cet accroissement; de sorte qu'en désignant par L, S et V la longueur, la surface et le volume d'un corps à 0°, par L', S' et V', la longueur, la surface et le volume du même corps à $t°$, et enfin par $\delta$ la dilatation linéaire pour 1°, on a

$$L' = L(1 + \delta t); \quad S' = S(1 + 2\delta t); \quad V' = V(1 + 3\delta t).$$

33. Un corps creux, d'une matière homogène, augmente de volume par l'accroissement de température de la même quantité que s'il était plein.

34. *Dilatation des liquides.* D'après les expériences de M. Dulong, les dilatations de l'air et du mercure étaient les mêmes jusqu'à 100;

mais, en partant du nouveau coefficient de dilatation de l'air, l'identité se prolonge plus loin; car si un thermomètre à mercure indiquait 360°, un thermomètre à air, dans les mêmes circonstances, indiquerait 350°. Ainsi on peut sans erreur sensible admettre que les thermomètres à air et à mercure s'accordent jusqu'aux températures les plus élevées.

Le coefficient de dilatation du mercure est de $\frac{1}{5550}$.

Le coefficient de dilatation apparent du mercure dans le verre est de $\frac{1}{6480}$.

35. Les dilatations des autres liquides relativement à celles du mercure, sont très-irrégulières. L'eau a un maximum de densité qui correspond à 4°,1.

*Densité et volume de l'eau de* 0° *à* 30° *centigrades, par Hallstrom.*

| TEMPÉRATURES. | EN PRENANT POUR UNITÉ LE VOLUME ET LA DENSITÉ DE L'EAU A 0°. | | EN PRENANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4°,1. | |
|---|---|---|---|---|
| | DENSITÉS. | VOLUMES. | DENSITÉS. | VOLUMES. |
| 0° | 1,0 | 1,0 | 0,9998918 | 1,0001082 |
| 1 | 1,0000466 | 0,9999536 | 0,9999382 | 1,0000617 |
| 2 | 1,0000799 | 0,9999202 | 0,9999717 | 1,0000281 |
| 3 | 1,0001004 | 0,9998996 | 0,9999920 | 1,0000078 |
| 4 | 1,00010817 | 0,9998918 | 0,9999995 | 1,0000002 |
| 4,1 | 1,00010824 | 0,99989177 | 1,0 | 1,0 |
| 5 | 1,0001032 | 0,9998968 | 0,9999950 | 1,0000050 |
| 6 | 1,0000856 | 0,9999144 | 0,9999772 | 1,0000226 |
| 7 | 1,0000355 | 0,9999445 | 0,9999472 | 1,0000527 |
| 8 | 1,0000129 | 0,9999872 | 0,9999044 | 1,0000954 |
| 9 | 0,9999579 | 1,0000421 | 0,9998497 | 1,0001501 |
| 10 | 0,9998906 | 1,0001004 | 0,9997825 | 1,0002200 |
| 11 | 0,9998112 | 1,0001888 | 0,9997030 | 1,0002970 |
| 12 | 0,9997196 | 1,0002804 | 0,9996117 | 1,0003888 |
| 13 | 0,9996160 | 1,0003841 | 0,9995080 | 1,0004924 |
| 14 | 0,9995005 | 1,0004997 | 0,9993922 | 1,0006081 |
| 15 | 0,9993731 | 1,0006273 | 0,9992647 | 1,0007357 |
| 16 | 0,9992340 | 1,0007666 | 0,9991260 | 1,0008747 |
| 17 | 0,9990832 | 1,0009176 | 0,9989752 | 1,0010259 |
| 18 | 0,9989207 | 1,0010805 | 0,9988125 | 1,0011888 |

| TEMPÉRATURES. | EN PRENANT POUR UNITÉ LE VOLUME ET LA DENSITÉ DE L'EAU A 0°. | | EN PRENANT POUR UNITÉ LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4°,1. | |
|---|---|---|---|---|
| | DENSITÉS. | VOLUMES. | DENSITÉS. | VOLUMES. |
| 19 | 0,9987468 | 1,0012548 | 0,9986387 | 1,0013631 |
| 20 | 0,9985615 | 1,0014406 | 0,9984534 | 1,0015490 |
| 21 | 0,9983648 | 1,0016379 | 0,9982570 | 1,0017560 |
| 22 | 0,9981569 | 1,0018465 | 0,9980489 | 1,0019549 |
| 23 | 0,9979379 | 1,0020664 | 0,9978300 | 1,0021746 |
| 24 | 0,9977077 | 1,0022976 | 0,9976000 | 1,0024058 |
| 25 | 0,9974666 | 1,0025398 | 0,9973587 | 1,0026483 |
| 26 | 0,9972146 | 1,0027932 | 0,9971070 | 1,0029016 |
| 27 | 0,9969518 | 1,0030575 | 0,9968439 | 1,0031662 |
| 28 | 0,9966783 | 1,0033328 | 0,9965704 | 1,0034414 |
| 29 | 0,9963941 | 1,0039189 | 0,9962864 | 1,0037274 |
| 30 | 0,9960993 | 1,0039160 | 0,9959917 | 1,0040245 |

*Dilatation apparente de différents liquides dans le verre.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | DILATATION DE 0° A 100°. | |
|---|---|---|
| Eau | 1/22 | 0,0466 |
| Acide hydrochlorique (P. S. 1,137) | 1/27 | 0,0600 |
| Acide nitrique (P. S. 1,40) | 1/9 | 0,1100 |
| Acide sulfurique (P. S. 1,85) | 1/17 | 0,0600 |
| Éther sulfurique | 1/14 | 0,0700 |
| Huile d'olive et de lin | 1/12 | 0,0800 |
| Essence de térébenthine | 1/14 | 0,0700 |
| Eau saturée de sel marin | 1/20 | 0,0500 |
| Alcool | 1/9 | 0,1100 |
| Mercure | 1/64 | 0,0156 |
| *Dilatation absolue pour 1°.* | | |
| Mercure de 0° à 100° | 1/5550 | 0,0180180 |
| Mercure de 100° à 200° | 1/5425 | 0,0184331 |
| Mercure de 200° à 300° | 1/5300 | 0,0188679 |

36. *Dilatation des gaz.* Tous les gaz se dilatent de la même manière, du moins à partir des températures suffisamment éloignées de celles qui correspondent à leur liquéfaction. L'uniformité de leur dilatation résulte de la convention faite pour mesurer les températures.

Les lois de la dilatation des gaz furent découvertes presque en même temps par M. Gay-Lussac en France, et par Dalton en Angleterre. Charles avait depuis longtemps constaté l'égalité de dilatation des gaz, mais il n'avait pas mesuré le coefficient de dilatation. Dalton avait trouvé 0,372 pour la dilatation absolue de 0° à 100°, et il prétendait que la dilatation pour chaque degré était $\frac{1}{267}$ du volume du gaz à la température inférieure, par exemple que de 20° à 21° la dilatation était $\frac{1}{267}$ du volume du gaz à 20°; tandis que, d'après M. Gay-Lussac, la dilatation est $\frac{1}{267}$ ou 0,00375 du volume à 0°. Les expériences faites depuis par MM. Petit et Dulong ont démontré l'exactitude de la loi de M. Gay-Lussac. Mais de nouvelles expériences faites par M. Rudberg donnent 0,00364 pour coefficient de dilatation des gaz, et le même chiffre a été obtenu par M. Regnault : nous adopterons ce dernier nombre.

37. En désignant par V le volume d'un gaz à 0°, par V′ son volume à $t°$, sous la même pression on a

$$V' = V(1 + 0{,}00364 \,.\, t). \qquad (1)$$

Si V était le volume d'un gaz à $t°$, V′ le volume du même gaz à $t'°$, toujours sous la même pression, on aurait

$$V' = V\frac{1 + 0{,}00364\,t'}{1 + 0{,}00364\,t}; \quad \text{ou} \quad V' = V(1 + 0{,}00364\,(t' - t)). \qquad (2)$$

Cette dernière formule a été obtenue en négligeant les termes qui renferment le carré de 0,00364; comme elle est beaucoup plus simple que la première et en réalité tout aussi exacte, nous l'emploierons de préférence.

Si le volume V était à la pression $p$, et le volume V′ à la pression $p'$, on aurait

$$V' = \frac{Vp}{p'}\left(\frac{1+0{,}00364t}{1+0{,}00364t'}\right),$$

et en négligeant le carré de 0,00364, on a

$$V' = \frac{Vp}{p'}(1 + 0{,}00364\,(t' - t)). \qquad (3)$$

## § 6. — DES VAPEURS.

38. Lorsqu'un espace vide renferme un liquide vaporisable, il se remplit instantanément de toute la vapeur qui peut se former à la température du liquide. Si l'espace augmente, le liquide fournit de nouvelle vapeur, de manière que la force élastique et la densité de la vapeur restent constantes; si l'espace diminue, une certaine partie de la vapeur se condense, de manière à conserver à celle qui reste sa tension et sa densité primitives. Mais cette permanence n'a lieu qu'autant que, dans le premier cas, une source de chaleur fournit au liquide la chaleur employée à la formation des vapeurs; et que, dans le second, l'enveloppe peut absorber et disperser la chaleur qui résulte de la condensation partielle de la vapeur. En admettant les mêmes hypothèses, si on élevait ou si on abaissait la température du liquide, pendant toutes les variations de l'étendue de l'espace, la vapeur aurait toujours la tension et la densité maximum qui correspondent à la température du liquide.

39. On appelle vapeur saturée, la vapeur qui a le maximum de tension et le maximum de densité qui correspondent à sa température.

40. Si un espace saturé de vapeurs ne renfermait point de liquide, en supposant que l'enveloppe ne fournît point de chaleur et n'en absorbât point, par l'accroissement du volume de l'espace, la densité, la tension et la température de la vapeur diminueraient; et par la diminution de l'espace, la densité, la tension et la température de la vapeur augmenteraient, et, dans ce dernier cas, on ne sait pas si une partie de la vapeur ne serait pas condensée. D'après M. de Pambour, dans ces deux circonstances la vapeur est toujours saturée, c'est-à-dire, elle a toujours la tension maximum qui correspond à sa température, et, dans la dernière il n'y a point de vapeurs condensées.

41. Dans le cas que nous venons de considérer, si on échauffait et si on augmentait l'espace renfermant la vapeur, sa force élastique varierait comme celle d'un gaz permanent. En général, une vapeur non saturée se comporte comme un gaz permanent par les variations de température et de pression, pourvu que ces variations ne l'amènent pas à la saturation.

42. Les tableaux suivants renferment la tension de la vapeur d'eau à différentes températures.

*Tensions de la vapeur d'eau de* —20° *à* 100 *et pressions sur* 1 *centimètre carré.*

| DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimèt. | PRESSION sur un centimètre carré. | DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimèt. | PRESSION sur un centimètre carré. |
|---|---|---|---|---|---|
| degr. | mm. | kil. | degr. | mm. | kil. |
| —20 | 1,333 | 0,0018 | 33 | 36,188 | 0,0492 |
| —15 | 1,879 | 0,0026 | 34 | 38,254 | 0,0520 |
| —10 | 2,631 | 0,0036 | 35 | 40,404 | 0,0549 |
| — 5 | 3,660 | 0,0050 | 36 | 42,743 | 0,0581 |
| 0 | 5,059 | 0,0069 | 37 | 45,038 | 0,0612 |
| 1 | 5,393 | 0,0074 | 38 | 47,579 | 0,0646 |
| 2 | 5,749 | 0,0078 | 39 | 50,147 | 0,0681 |
| 3 | 6,123 | 0,0084 | 40 | 52,998 | 0,0720 |
| 4 | 6,523 | 0,0089 | 41 | 55,772 | 0,0758 |
| 5 | 6,947 | 0,0094 | 42 | 58,792 | 0,0799 |
| 6 | 7,396 | 0,0101 | 43 | 61,958 | 0,08418 |
| 7 | 7,871 | 0,0107 | 44 | 65,627 | 0,08916 |
| 8 | 8,375 | 0,0114 | 45 | 68,751 | 0,09340 |
| 9 | 8,909 | 0,0122 | 46 | 72,393 | 0,09835 |
| 10 | 9,475 | 0,0129 | 47 | 76,205 | 0,10353 |
| 11 | 10,074 | 0,0137 | 48 | 80,195 | 0,10900 |
| 12 | 10,707 | 0,0146 | 49 | 84,370 | 0,11662 |
| 13 | 11,378 | 0,0155 | 50 | 88,743 | 0,12056 |
| 14 | 12,087 | 0,0165 | 51 | 93,301 | 0,12676 |
| 15 | 12,837 | 0,0170 | 52 | 98,075 | 1,13325 |
| 16 | 13,630 | 0,0186 | 53 | 103,060 | 0,13999 |
| 17 | 14,468 | 0,0197 | 54 | 108,270 | 0,14710 |
| 18 | 15,353 | 0,0209 | 55 | 113,710 | 0,15449 |
| 19 | 16,288 | 0,0222 | 56 | 119,390 | 0,16220 |
| 20 | 17,314 | 0,0235 | 57 | 125,310 | 0,17035 |
| 21 | 18,317 | 0,0250 | 58 | 131,500 | 0,17866 |
| 22 | 19,447 | 0,0265 | 59 | 137,940 | 0,18736 |
| 23 | 20,577 | 0,0281 | 60 | 144,660 | 0,19653 |
| 24 | 21,805 | 0,0297 | 61 | 151,700 | 0,20610 |
| 25 | 23,090 | 0,0314 | 62 | 158,960 | 0,21586 |
| 26 | 24,452 | 0,0334 | 63 | 166,560 | 0,22639 |
| 27 | 25,881 | 0,0353 | 64 | 174,470 | 0,23758 |
| 28 | 27,390 | 0,0374 | 65 | 182,710 | 0,24823 |
| 29 | 29,045 | 0,0396 | 66 | 191,270 | 0,25986 |
| 30 | 30,643 | 0,0418 | 67 | 200,180 | 0,27196 |
| 31 | 32,410 | 0,0440 | 68 | 209,440 | 0,28456 |
| 32 | 34,261 | 0,0465 | 69 | 219,060 | 0,29761 |

| DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimèt. | PRESSION sur un centimètre carré. | DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimèt. | PRESSION sur un centimètre carré. |
|---|---|---|---|---|---|
| degr. | mm. | kil. | degr. | mm. | kil. |
| 70 | 229,070 | 0,31121 | 86 | 449,260 | 0,61036 |
| 71 | 239,450 | 0,32532 | 87 | 467,380 | 0,63498 |
| 72 | 250,230 | 0,33996 | 88 | 486,090 | 0,66040 |
| 73 | 261,430 | 0,35518 | 89 | 505,380 | 0,68661 |
| 74 | 273,030 | 0,37094 | 90 | 525,28 | 0,71364 |
| 75 | 285,070 | 0,39632 | 91 | 545,80 | 0,74152 |
| 76 | 297,570 | 0,40428 | 92 | 566,95 | 0,77026 |
| 77 | 310,490 | 0,42184 | 93 | 588,74 | 0,79986 |
| 78 | 323,890 | 0,44004 | 94 | 611,18 | 0,83035 |
| 79 | 337,760 | 0,45888 | 95 | 634,27 | 0,86172 |
| 80 | 352,080 | 0,47834 | 96 | 658,05 | 0,89402 |
| 81 | 367,000 | 0,49860 | 97 | 682,59 | 0,92736 |
| 82 | 382,380 | 0,51950 | 98 | 707,63 | 0,96138 |
| 83 | 398,280 | 0,54110 | 99 | 733,46 | 0,99448 |
| 84 | 414,730 | 0,56345 | 100 | 760,00 | 1,03253 |
| 85 | 431,710 | 0,58632 | | | |

Dans les limites de température de cette table, la température et la force élastique sont liées par la formule

$$t = 85\sqrt[6]{f} - 75,$$

dans laquelle $t$ représente la température en degrés centigrades, et $f$ la force élastique en centimètres de mercure. Cette formule, entièrement empirique, est due à Tredgold.

43. *Tensions de la vapeur d'eau à de hautes températures.* La mesure de la force élastique de la vapeur d'eau à de hautes températures présentait de grandes difficultés et n'était pas sans danger. On ne connaissait que des tensions inférieures à huit atmosphères et les résultats obtenus par différents physiciens ne s'accordaient pas entre eux, jusqu'en 1830, époque de la publication des expériences de MM. Dulong et Arago. Le tableau suivant donne les forces élastiques de la vapeur d'eau et les températures correspondantes de 1 à 24 atmosphères d'après l'observation de ces deux physiciens, et de 24 à 50 atmosphères les résultats du calcul. Nous plaçons à côté les pressions en kilogrammes qu'exercerait la vapeur à ces températures, parce que ces nombres peuvent être utiles dans les applications.

*Table des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures.*

| ÉLASTICITÉ DE LA VAPEUR, en prenant la pression de l'atmosphère pour unité. | COLONNE de mercure à 0° qui mesure l'élasticité. | TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermom. centigrade à mercure. | PRESSION sur un centimètre carré. |
|---|---|---|---|
| | mm. | | kil. |
| 1 | 0,7600 | 100° | 1,033 |
| 1 1/2 | 1,1400 | 112,2 | 1,549 |
| 2 | 1,5200 | 121,4 | 2,066 |
| 2 1/2 | 1,9000 | 128,8 | 2,582 |
| 3 | 2,2800 | 135,1 | 3,099 |
| 31/2 | 2,66 | 140,6 | 3,615 |
| 4 | 3,04 | 145,4 | 4,132 |
| 4 1/2 | 3,42 | 149,06 | 4,648 |
| 5 | 3,80 | 153,08 | 5,165 |
| 5 1/2 | 4,18 | 153,8 | 5,681 |
| 6 | 4,56 | 160,2 | 6,198 |
| 6 1/2 | 4,94 | 163,48 | 6,714 |
| 7 | 5,32 | 166,5 | 7,231 |
| 7 1/2 | 5,70 | 169,37 | 7,747 |
| 8 | 6,08 | 172,1 | 8,264 |
| 9 | 6,84 | 177,1 | 9,297 |
| 10 | 7,60 | 181,6 | 10,33 |
| 11 | 8,36 | 186,03 | 11,363 |
| 12 | 9,12 | 190,0 | 12,396 |
| 13 | 9,88 | 193,7 | 13,429 |
| 14 | 10,64 | 197,19 | 14,462 |
| 15 | 11,40 | 200,48 | 15,495 |
| 16 | 12,16 | 203,60 | 16,528 |
| 17 | 12,92 | 206,57 | 17,561 |
| 18 | 13,68 | 209,4 | 18,594 |
| 19 | 14,44 | 212,1 | 19,627 |
| 20 | 15,20 | 214,7 | 20,660 |
| 21 | 15,96 | 217,2 | 21,693 |
| 22 | 16,72 | 219,6 | 22,726 |
| 23 | 17,48 | 221,9 | 23,759 |
| 24 | 18,24 | 224,2 | 24,792 |
| 25 | 19,00 | 226,3 | 25,825 |
| 30 | 22,80 | 236,2 | 30,990 |
| 35 | 26,60 | 244,85 | 36,155 |
| 40 | 30,40 | 252,55 | 41,320 |
| 45 | 34,20 | 259,52 | 46,485 |
| 50 | 38,00 | 265,89 | 51,650 |

44. Les nombres renfermés dans ce dernier tableau satisfont à la formule

$$t = \frac{\sqrt[5]{f} - 1}{0{,}7153},$$

dans laquelle $t$ représente la température en degrés centigrades à partir de 100°, en prenant pour unité l'intervalle de 100°, et $f$ la force élastique en atmosphères de 0,76. Mais de 1 à 4 atmosphères, la formule de Tredgold s'accorde mieux avec les expériences.

45. Pour tous les autres liquides vaporisables, la tension peut se calculer approximativement au moyen de cette loi découverte par Dalton : *les vapeurs des différents liquides ont des tensions égales à des températures également éloignées de celles de leur ébullition.*

46. *Densité des vapeurs.* On désigne sous le nom de densité de la vapeur d'un certain liquide, le nombre constant qui représente le rapport des poids de deux volumes égaux de vapeur et d'air à la même température et à la même pression.

47. Le tableau suivant renferme la densité de la vapeur d'un certain nombre de liquides.

| NOMS DES LIQUIDES. | DENSITÉS DES VAPEURS. | TEMPÉRATURES DE L'ÉBULLITION. |
|---|---|---|
| Eau | 0,6235 | 100 |
| Acide hydro-cyanique | 0,9476 | 26,50 |
| Alçool | 1,6138 | 78 |
| Éther hydro-chlorique | 2,219 | 11 |
| Éther sulfurique | 2,5860 | 36 |
| Sulfure de carbone | 2,6447 | 47 |
| Essence de térébenthine | 5,0130 | 157 |
| Éther hydriodique | 5,4749 | 65 |

48. On désigne sous le nom de densité d'une vapeur à une certaine température et à une certaine pression, le nombre de fois que le poids d'un certain volume de cette vapeur à cette température et sous cette pression, contient le poids d'un même volume d'eau à 4°.

49. La densité d'une vapeur à une certaine température et sous une certaine pression, est égale à la densité tabulaire multipliée par celle de l'air à cette température et sous cette pression. La densité $d$ de la vapeur d'eau à $t^o$ et sous la pression $p$ est représentée par la formule

$$d = 0{,}6235 \frac{p}{0{,}76.(1+at)} \cdot 0{,}0013.$$

50. Le tableau suivant renferme la tension et la densité de la vapeur d'eau à différentes températures, ainsi que son volume rapporté à celui de l'eau qui l'a produit.

*Tableau de la tension, de la densité et du volume de la vapeur d'eau à différentes températures.*

| TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mm. | | | | mm. | | |
| —20° | 1,333 | 0,00000154 | 650588 | 20 | 17,314 | 1718 | 58224 |
| —15 | 1,879 | 212 | 470898 | 21 | 18,317 | 1811 | 55206 |
| —10 | 2,631 | 292 | 342984 | 22 | 19,417 | 1914 | 52260 |
| — 5 | 3,660 | 398 | 251358 | 23 | 20,577 | 2021 | 49487 |
| 0 | 5,059 | 540 | 182323 | 24 | 21,805 | 2133 | 46877 |
| 1 | 5,393 | 573 | 174495 | 25 | 23,090 | 2252 | 44411 |
| 2 | 5,748 | 609 | 164332 | 26 | 24,452 | 2376 | 42084 |
| 3 | 6,123 | 646 | 154842 | 27 | 25,881 | 2507 | 39895 |
| 4 | 6,523 | 686 | 145886 | 28 | 27,890 | 2643 | 37838 |
| 5 | 6,947 | 727 | 137488 | 29 | 29,045 | 2794 | 35796 |
| 6 | 7,396 | 772 | 129587 | 30 | 30,643 | 2938 | 34041 |
| 7 | 7,871 | 818 | 122241 | 31 | 32,410 | 3097 | 32291 |
| 8 | 8,375 | 867 | 115305 | 32 | 34,261 | 3263 | 30650 |
| 9 | 8,909 | 919 | 108790 | 33 | 36,188 | 3435 | 29112 |
| 10 | 9,475 | 974 | 102670 | 34 | 38,254 | 3619 | 27636 |
| 11 | 10,074 | 0,00001032 | 99202 | 35 | 40,404 | 3809 | 26253 |
| 12 | 10,707 | 1092 | 91564 | 36 | 42,743 | 0,00004017 | 24897 |
| 13 | 11,378 | 1157 | 86426 | 37 | 45,038 | 4219 | 23704 |
| 14 | 12,087 | 1224 | 81686 | 38 | 47,579 | 4442 | 22513 |
| 15 | 12,837 | 1299 | 77008 | 39 | 50,147 | 4666 | 21429 |
| 16 | 13,630 | 1372 | 72913 | 40 | 52,998 | 4916 | 20343 |
| 17 | 14,468 | 1451 | 68923 | 41 | 55,772 | 5156 | 19396 |
| 18 | 15,353 | 1534 | 65201 | 42 | 58,792 | 5418 | 18459 |
| 19 | 16,288 | 1622 | 61654 | 43 | 61,958 | 5691 | 17572 |

| TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | mm. | | | | mm. | | |
| 44° | 65,627 | 0,00006023 | 16805 | 85 | 431,710 | 0,00034916 | 2864 |
| 45 | 68,751 | 6274 | 15938 | 86 | 449,260 | 36237 | 2760 |
| 46 | 72,393 | 6585 | 15185 | 87 | 467,380 | 37590 | 2660 |
| 47 | 76,205 | 6910 | 14472 | 88 | 486,090 | 38984 | 2565 |
| 48 | 80,195 | 7242 | 13809 | 89 | 505,380 | 40417 | 2474 |
| 49 | 84,370 | 7602 | 13154 | 90 | 525,280 | 41891 | 2387 |
| 50 | 88,742 | 7970 | 12546 | 91 | 545,800 | 43405 | 2304 |
| 51 | 93,301 | 8354 | 11971 | 92 | 566,950 | 44956 | 2224 |
| 52 | 98,075 | 8753 | 11424 | 93 | 588,740 | 46556 | 2148 |
| 53 | 103,060 | 9174 | 10901 | 94 | 611,180 | 48201 | 2075 |
| 54 | 108,270 | 9606 | 10410 | 95 | 634,270 | 49886 | 2005 |
| 55 | 113,710 | 0,00010054 | 9946 | 96 | 658,050 | 51613 | 1938 |
| 56 | 119,390 | 10525 | 9501 | 97 | 682,590 | 53388 | 1873 |
| 57 | 125,310 | 11011 | 9082 | 98 | 707,630 | 55191 | 1812 |
| 58 | 131,550 | 11523 | 8680 | 99 | 733,460 | 57055 | 1751 |
| 59 | 137,940 | 12044 | 8303 | 100 | 760,000 | 58955 | 1695 |
| 60 | 144,660 | 12599 | 7937 | 106,60 | 950,000 | 72391 | 1381 |
| 61 | 151,700 | 13179 | 7594 | 112,40 | 1140,000 | 85539 | 1169 |
| 62 | 158,960 | 13760 | 7267 | 117,10 | 1330,000 | 98324 | 1014 |
| 63 | 166,560 | 14374 | 6957 | 121,55 | 1520,000 | 0,00111652 | 896 |
| 64 | 174,470 | 15010 | 6662 | 125,50 | 1710,000 | 123923 | 806 |
| 65 | 182,710 | 15668 | 6382 | 128,85 | 1900,000 | 136636 | 732 |
| 66 | 191,270 | 16356 | 6114 | 132,15 | 2090,000 | 0,00149056 | 671 |
| 67 | 200,180 | 17066 | 5860 | 135,00 | 2280,000 | 161453 | 619 |
| 68 | 209,440 | 17797 | 5619 | 137,70 | 2470,000 | 173739 | 576 |
| 69 | 219,060 | 18566 | 5386 | 140,35 | 2660,000 | 185886 | 538 |
| 70 | 229,070 | 19355 | 5167 | 142,70 | 2850,000 | 198020 | 505 |
| 71 | 239,450 | 20174 | 4957 | 144,95 | 3040,000 | 210067 | 476 |
| 72 | 250,230 | 21013 | 4759 | 146,76 | 3230,000 | 222731 | 449 |
| 73 | 261,430 | 21889 | 4569 | 149,15 | 3420,000 | 233938 | 428 |
| 74 | 273,030 | 22794 | 4387 | 151,15 | 3610,000 | 245763 | 407 |
| 75 | 285,070 | 23789 | 4204 | 153,30 | 3800,000 | 257363 | 389 |
| 76 | 297,570 | 0,00024702 | 4048 | 155,00 | 3990,000 | 268956 | 392 |
| 77 | 310,490 | 15699 | 3891 | 156,70 | 4180,000 | 280827 | 356 |
| 78 | 323,890 | 26739 | 3741 | 158,30 | 4370,000 | 292485 | 342 |
| 79 | 337,760 | 27789 | 3599 | 160,00 | 4560,000 | 304651 | 328 |
| 80 | 352,080 | 28889 | 3462 | 161,54 | 4750,000 | 315513 | 317 |
| 81 | 367,000 | 30025 | 3331 | 163,25 | 4940,000 | 326828 | 306 |
| 82 | 382,380 | 31195 | 3206 | 164,84 | 5130,000 | 338148 | 296 |
| 83 | 398,280 | 32399 | 3087 | 166,42 | 5320,000 | 349393 | 286 |
| 84 | 414,730 | 33637 | 2973 | 167,94 | 5510,000 | 360606 | 277 |

| TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRAT. | TENSION. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 169,41 | 5700,000 | 371783 | 269 | 177,40 | 6840,000 | 438111 | 228 |
| 170,78 | 5890,000 | 382907 | 261 | 178,68 | 7030,000 | 447955 | 223 |
| 172,13 | 6080,000 | 394110 | 254 | 179,89 | 7220,000 | 459873 | 217 |
| 173,46 | 6270,000 | 405198 | 247 | 180,95 | 7418,000 | 473858 | 212 |
| 174,79 | 6460,000 | 416123 | 240 | 182,00 | 7600,000 | 481690 | 208 |
| 176,11 | 6650,000 | 427182 | 234 | 215,00 | 23800,000 | 0,01570780 | 64 |

*Poids d'un mètre cube de vapeur saturée à différentes températures.*

| TEMPÉRATURE. | POIDS EN GRAMMES. | TEMPÉRATURE. | POIDS EN GRAMMES. |
|---|---|---|---|
| 0° | 5,3 | 55 | 102,20 |
| 5 | 7,3 | 60 | 126,10 |
| 10 | 9,7 | 65 | 159,20 |
| 15 | 13,10 | 70 | 196,40 |
| 20 | 17,30 | 75 | 238,80 |
| 25 | 22,70 | 80 | 293,60 |
| 30 | 29,70 | 85 | 355,70 |
| 35 | 39,00 | 90 | 426,10 |
| 40 | 49,90 | 95 | 507,40 |
| 45 | 63,70 | 100 | 590 |
| 50 | 71,00 | | |

*Poids de la vapeur renfermée dans 1 mètre cube d'air saturé à différentes températures, sous la pression de* 0$^{m}$,76.

| TEMPÉRATURE. | POIDS EN GRAMMES. | TEMPÉRATURE. | POIDS EN GRAMMES. |
|---|---|---|---|
| 0° | 5,2 | 55 | 88,74 |
| 5 | 7,2 | 60 | 105,84 |
| 10 | 9,50 | 65 | 127,20 |
| 15 | 12,83 | 70 | 141,96 |
| 20 | 16,78 | 75 | 173,74 |
| 25 | 22,01 | 80 | 199,24 |
| 30 | 28,51 | 85 | 227,20 |
| 35 | 37,00 | 90 | 251,34 |
| 40 | 46,40 | 95 | 273,78 |
| 45 | 58,60 | 100 | 295. |
| 50 | 63,63 | | |

51. M. de Pambour a trouvé par tâtonnement une formule au moyen de laquelle on obtient le volume d'un poids donné de vapeur en fonction seulement de la pression; cette formule est

$$v = \frac{10000}{0{,}4227 + 5{,}2897\,p}$$

dans laquelle $v$ représente le volume de vapeur rapporté au volume d'eau qui l'a produit, et $p$ la pression par centimètre carré en kilogrammes. Si la pression était estimée en mètres de mercure, la formule serait

$$v = \frac{10000}{0{,}4227 + 7{,}14\,p}.$$

52. *Mélanges des gaz et des vapeurs.* Lorsqu'on met un liquide dans un vase fermé renfermant un gaz sec, on observe les faits suivants : 1° les vapeurs ne se forment que lentement, et ce n'est qu'après un certain temps, plus ou moins long, que le gaz renferme toute la vapeur qui peut se produire à la température du liquide; 2° la force élastique du mélange saturé de vapeur est égale à la force élastique du gaz augmentée de la tension maximum de la vapeur à cette température, et par conséquent la quantité de vapeur que renferme le gaz, est égale à celle qui se produirait à la même température dans le même espace vide. Ainsi les vapeurs se développent dans les gaz comme dans le vide; seulement, les gaz opposent à l'évaporation un obstacle mécanique qui la retarde, et le mélange des gaz et des vapeurs s'effectue comme celui des gaz permanents.

53. *Hygrométrie.* On désigne sous le nom d'état hygrométrique de l'air, le rapport de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'air, à la quantité maximum qui pourrait s'y trouver si l'air était saturé; ou le rapport de la tension de la vapeur d'eau dans l'air à la tension maximum correspondante à cette température.

Les deux moyens généralement employés pour déterminer l'état hygrométrique de l'air sont : 1° la détermination de l'abaissement de température que l'air devrait éprouver pour être saturé; 2° l'emploi de l'hygromètre de Saussure.

54. La première méthode consiste à mettre de l'eau dans un vase d'argent et à la refroidir successivement par de l'eau à la glace, jusqu'à ce que la vapeur d'eau commence à se condenser à la surface du

vase : la température correspondante est celle à laquelle l'air devrait être abaissé pour se trouver saturé. Les tables donnent la tension maximum de la vapeur à cette température, et cette tension est celle de la vapeur qui se trouve dans l'air. On peut aussi employer pour cet objet l'hygromètre de Daniel.

55. L'hygromètre de Saussure donne des indications desquelles on peut facilement déduire l'état hygrométrique de l'air d'après le tableau suivant :

*Tableau de la force élastique de la vapeur, correspondante aux degrés de l'hygromètre, à la température de* 10° *centésimaux, exprimée en centièmes de la tension à la saturation.*

| TENSION de la vapeur. | DEGRÉS correspondants de l'hygromètre. | TENSION de la vapeur. | DEGRÉS correspondants de l'hygromètre. | DEGRÉS de l'hygrom. | TENSIONS correspondantes de la vapeur. | DEGRÉS de l'hygrom. | TENSIONS correspondantes de la vapeur. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,00 | 25 | 46,24 | 0 | 0,00 | 25 | 12,05 |
| 1 | 2,19 | 26 | 47,55 | 1 | 0,45 | 26 | 12,59 |
| 2 | 4,37 | 27 | 48,86 | 2 | 0,90 | 27 | 13,14 |
| 3 | 6,56 | 28 | 50,18 | 3 | 1,35 | 28 | 13,69 |
| 4 | 8,75 | 29 | 51,49 | 4 | 1,80 | 29 | 14,23 |
| 5 | 10,94 | 30 | 52,81 | 5 | 2,25 | 30 | 14,78 |
| 6 | 12,93 | 31 | 53,96 | 6 | 2,71 | 31 | 15,36 |
| 7 | 14,92 | 32 | 55,11 | 7 | 3,18 | 32 | 15,94 |
| 8 | 16,92 | 33 | 56,27 | 8 | 3,64 | 33 | 16,52 |
| 9 | 18,91 | 34 | 57,42 | 9 | 4,10 | 34 | 17,10 |
| 10 | 20,91 | 35 | 58,58 | 10 | 4,57 | 35 | 17,68 |
| 11 | 22,81 | 36 | 59,61 | 11 | 5,05 | 36 | 18,30 |
| 12 | 24,71 | 37 | 60,64 | 12 | 5,52 | 37 | 18,92 |
| 13 | 26,61 | 38 | 61,66 | 13 | 6,00 | 38 | 19,54 |
| 14 | 28,51 | 39 | 62,69 | 14 | 6,48 | 39 | 20,16 |
| 15 | 30,41 | 40 | 63,72 | 15 | 6,96 | 40 | 20,78 |
| 16 | 32,08 | 41 | 64,63 | 16 | 7,46 | 41 | 21,45 |
| 17 | 33,76 | 42 | 65,53 | 17 | 7,95 | 42 | 22,12 |
| 18 | 35,43 | 43 | 66,43 | 18 | 8,45 | 43 | 22,79 |
| 19 | 37,11 | 44 | 67,34 | 19 | 8,95 | 44 | 23,46 |
| 20 | 38,78 | 45 | 68,24 | 20 | 9,45 | 45 | 24,13 |
| 21 | 40,27 | 46 | 69,03 | 21 | 9,97 | 46 | 24,86 |
| 22 | 41,76 | 47 | 69,83 | 22 | 10,49 | 47 | 25,59 |
| 23 | 43,26 | 48 | 70,62 | 23 | 11,01 | 48 | 26,32 |
| 24 | 44,75 | 49 | 71,42 | 24 | 11,53 | 49 | 27,06 |

| TENSION de la vapeur. | DEGRÉS correspondants de l'hygromètre. | TENSION de la vapeur. | DEGRÉS correspondants de l'hygromètre. | DEGRÉS de l'hygrom. | TENSIONS correspondantes de la vapeur. | DEGRÉS de l'hygrom. | TENSIONS correspondantes de la vapeur. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 72,21 | 76 | 88,47 | 50 | 27,79 | 76 | 55,25 |
| 51 | 72,94 | 77 | 88,99 | 51 | 28,58 | 77 | 56,74 |
| 52 | 73,68 | 78 | 89,51 | 52 | 29,38 | 78 | 58,24 |
| 53 | 74,41 | 79 | 90,03 | 53 | 30,17 | 79 | 59,73 |
| 54 | 75,14 | 80 | 90,55 | 54 | 30,97 | 80 | 61,22 |
| 55 | 75,87 | 81 | 91,05 | 55 | 31,76 | 81 | 62,89 |
| 56 | 76,54 | 82 | 91,55 | 56 | 32,66 | 82 | 64,57 |
| 57 | 77,21 | 83 | 92,05 | 57 | 33,57 | 83 | 66,24 |
| 58 | 77,88 | 84 | 92,54 | 58 | 34,47 | 84 | 67,92 |
| 59 | 78,55 | 85 | 93,04 | 59 | 35,37 | 85 | 69,59 |
| 60 | 79,22 | 86 | 93,52 | 60 | 36,28 | 86 | 71,49 |
| 61 | 79,84 | 87 | 94,00 | 61 | 37,31 | 87 | 73,39 |
| 62 | 80,46 | 88 | 94,48 | 62 | 38,34 | 88 | 75,29 |
| 63 | 81,08 | 89 | 94,95 | 63 | 39,36 | 89 | 77,19 |
| 64 | 81,70 | 90 | 95,43 | 64 | 40,39 | 90 | 79,09 |
| 65 | 82,32 | 91 | 95,90 | 65 | 41,42 | 91 | 81,09 |
| 66 | 82,90 | 92 | 96,36 | 66 | 42,58 | 92 | 83,08 |
| 67 | 83,48 | 93 | 96,82 | 67 | 43,73 | 93 | 85,08 |
| 68 | 84,06 | 94 | 97,29 | 68 | 44,49 | 94 | 87,07 |
| 69 | 84,64 | 95 | 97,75 | 69 | 46,04 | 95 | 89,06 |
| 70 | 85,22 | 96 | 98,20 | 70 | 47,19 | 96 | 91,25 |
| 71 | 85,77 | 97 | 98,69 | 71 | 48,51 | 97 | 93,44 |
| 72 | 86,31 | 98 | 99,10 | 72 | 49,82 | 98 | 95,63 |
| 73 | 86,86 | 99 | 99,55 | 73 | 51,14 | 99 | 97,81 |
| 74 | 87,41 | 100 | 100,00 | 74 | 52,45 | 100 | 100,00 |
| 75 | 87,95 | | | 75 | 53,76 | | |

## § 7. CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS.

56. En désignant sous le nom d'*unité de chaleur* la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer 1 k. d'eau de 1°, la *chaleur spécifique* d'un corps est le nombre d'unités de chaleur nécessaires pour échauffer 1 k. de ce corps de 1°.

Le tableau suivant donne les chaleurs spécifiques d'un grand nombre de corps; il est le résultat des travaux de M. Regnault qui, dans ses expériences, a employé la méthode des mélanges qu'il a perfectionnée de manière à la rendre supérieure à toutes les autres méthodes connues.

*Chaleurs spécifiques, d'après M. Regnault.*

| | |
|---|---|
| Fer | 0,11379 |
| Zinc | 0,09555 |
| Cuivre | 0,09515 |
| Argent | 0,05701 |
| Arsenic | 0,08140 |
| Plomb | 0,03140 |
| Bismuth | 0,03084 |
| Antimoine | 0,05077 |
| Étain des Indes | 0,05623 |
| Étain anglais | 0,05695 |
| Nickel | 0,10863 |
| Cobalt | 0,10696 |
| Platine laminé | 0,03243 |
| Platine en mousse | 0,03293 |
| Palladium | 0,05927 |
| Or | 0,03244 |
| Soufre | 0,20259 |
| Acier Haussmann | 0,11848 |
| Fine-metal | 0,12728 |
| Fonte de fer blanche de Bourg. | 0,12983 |
| Charbon | 0,24111 |
| Manganèse très-carburé | 0,14411 |
| Mercure | 0,03332 |
| Alliage 1 at. de plomb et 1 at. étain | 0,04073 |
| Alliage 1 at. de plomb, 2 at. étain | 0,04506 |
| Alliage 1 at. de plomb, 1 at. antimoine | 0,03880 |
| Alliage 1 at. bismuth, 1 at. étain. | 0,04000 |
| Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain. | 0,04504 |
| Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antimoine | 0,04621 |
| Alliage 1 at. bismuth, 2 at. étain, 1 at. antimoine, 2 at. zinc. | 0,05657 |
| Alliage 1 at. plomb, 2 at. étain, 1 at. bismuth | 0,04476 |
| Alliage 1 at. plomb, 2 at. étain, 2 at. bismuth | 0,06082 |
| Alliage 1 at. mercure, 1 at. étain. | 0,07294 |
| Alliage 1 at. mercure, 2 at. étain. | 0,06591 |
| Alliage 1 at. mercure, 1 at. plomb. | 0,03827 |
| Protoxyde de plomb, en poudre. | 0,05118 |
| — — fondu | 0,05089 |
| Protoxyde de manganèse | 0,15701 |
| Oxyde de cuivre | 0,14201 |
| Oxyde de nickel | 0,16234 |
| Magnésie | 0,24394 |
| Oxyde de zinc | 0,12480 |
| Peroxyde de fer (fer oligiste) | 0,16695 |
| Colcothar peu calciné | 0,17569 |
| — calciné une 2e fois | 0,17167 |
| — fortement calciné | 0,16921 |
| — — une 2e fois. | 0,16707 |
| Acide arsénieux | 0,12786 |
| Oxyde de chrome | 0,17960 |
| Oxyde de bismuth | 0,06053 |
| Oxyde d'antimoine | 0,09009 |
| Alumine (corindon) | 0,19762 |
| Saphir | 0,21732 |
| Acide stannique | 0,09326 |
| Acide stannique artificiel | 0,17164 |
| Acide stannique (rutile) | 0,17032 |
| Acide antimonieux | 0,09535 |
| Acide tungstique | 0,07983 |
| Acide molybdique | 0,13240 |
| Acide silicique | 0,19132 |
| Acide borique | 0,23743 |
| Oxyde de fer magnétique | 0,16780 |
| Proto-sulfure de fer | 0,13570 |
| Sulfure de nickel | 0,12813 |
| Sulfure de zinc | 0,12303 |
| Sulfure de plomb | 0,05086 |
| Sulfure de mercure | 0,05117 |
| Proto-sulfure d'étain | 0,08365 |
| Sulfure d'antimoine | 0,08403 |
| Sulfure de bismuth | 0,06002 |
| Bi-sulfure de fer | 0,13009 |
| Bi-sulfure d'étain | 0,11932 |
| Sulfure de cuivre | 0,12118 |
| Sulfure d'argent | 0,07460 |
| Pyrite magnétique | 0,16023 |
| Chlorure de sodium | 0,21401 |
| Chlorure de potassium | 0,17295 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Protochlorure de mercure.... | 0,05205 | Chromate de potasse..... .. | 0,18505 |
| Protochlorure de cuivre..... | 0,13827 | Bi-chromate de potasse..... | 0,18937 |
| Chlorure d'argent..... | 0,09109 | Borate de potasse..... | 0,21975 |
| Chlorure de barium..... | 0,08957 | Borate de soude.. ..... | 0,23823 |
| Chlorure de strontium..... | 0,11990 | Borate de plomb..... | 0,11409 |
| Chlorure de calcium..... | 0,16420 | Borate de potasse..... | 0,20478 |
| Chlorure de magnésium..... | 0,19460 | Borate de soude ..... | 0,25709 |
| Chlorure de plomb..... | 0,06641 | Borate de plomb..... | 0,09046 |
| Protochlorure de mercure..... | 0,06889 | Carbonate de potasse..... | 0,21623 |
| Chlorure de zinc..... | 0,13618 | Carbonate de soude.. ..... | 0,27275 |
| Perchlorure d'étain..... | 0,10161 | Carbonate de chaux (*spath d'Islande*)..... | 0,20858 |
| Chlorure de manganèse..... | 0,14255 | Aragonite..... | 0,20850 |
| Chloride d'étain..... | 0,14759 | Marbre saccharoïde gris..... | 0,20989 |
| Fluorure de calcium..... | 0,21492 | Craie blanche..... | 0,21485 |
| Nitrate de potasse..... | 0,23875 | Carbonate de baryte..... | 0,11038 |
| Nitrate de soude..... | 0,27821 | Carbonate de strontiane..... | 0,14483 |
| Nitrate d'argent..... | 0,14352 | Carbonate de fer..... | 0,19345 |
| Nitrate de baryte..... | 0,15228 | Carbonate de plomb..... | 0,08596 |
| Chlorate de potasse ..... | 0,20956 | Dolomie..... .. | 0,21743 |
| Phosphate de potasse..... | 0,19102 | Noir animal ..... | 0,26085 |
| Phosphate de soude ..... | 0,22833 | Charbon de bois..... | 0,24150 |
| Phosphate de plomb..... | 0,08208 | Coke du cannel-coal ..... | 0,20307 |
| Phosphate de plomb..... | 0,07982 | — de la houille..... | 0,20085 |
| Arséniate de potasse..... | 0,15631 | Charbon de l'anthracite du pays de Galles..... | 0,20172 |
| Arséniate de plomb ..... | 0,07280 | Charbon de l'anthracite de Philadelphie..... | 0,20100 |
| Sulfate de potasse..... | 0,19010 | Graphite naturel..... | 0,20187 |
| Sulfate de soude..... | 0,23115 | — des hauts-fourneaux.. | 0,49702 |
| Sulfate de baryte..... | 0,11285 | — des cornues du gaz.. | 0,20360 |
| Sulfate de strontiane ..... | 0,14279 | Diamant..... | 0,14687 |
| Sulfate de plomb ..... | 0,08723 | | |
| Sulfate de chaux ..... | 0,19656 | | |
| Sulfate de magnésie..... | 0,22159 | | |

A ces nombres nous en ajouterons d'autres qui peuvent être utiles dans les applications.

| | | |
|---|---|---|
| Chaux vive..... | 0,2169 | Laplace et Lavoisier. |
| Huile d'olive..... ..... | 0,3096 | |
| Acide sulfurique (densité 1,87) ..... | 0,3346 | |
| Acide nitrique (densité 1,30) ..... | 0,6614 | |
| Vinaigre..... | 0,920 | Dalton. |
| Acide hydrochlorique (densité 53)..... | 0,600 | id. |
| Alcool (densité 0,81)..... | 0,700 | id. |
| — (densité 0,793)..... | 0,622 | id. |

| | | |
|---|---|---|
| Éther sulfurique (densité 0,76) | 0,660 | id. |
| — (densité 0,715) | 0,520 | Despretz. |
| Essence de térébenthine (densité 0,872) | 0,472 | id. |
| Bois de pin | 0,650 | Mayer. |
| Bois de chêne | 0,570 | id. |
| Bois de poirier | 0,500 | id. |
| Flint-glass | 0,190 | Dalton. |
| Chlorure de sodium | 0,230 | id. |
| Fer de 0 à 100 | 0,1098 | Petit et Dulong. |
| Fer de 0 à 200 | 0,1150 | id. |
| Fer de 0 à 300 | 0,1218 | id. |
| Fer de 0 à 350 | 0,1255 | id. |

57. La chaleur spécifique d'un même corps augmente avec la température, surtout pour les températures auxquelles il commence à se ramollir; elle varie aussi avec l'état d'agrégation des molécules; elle est d'autant plus petite que cette agrégation est plus grande. Cependant M. Regnault a reconnu, à la suite des nombreuses expériences dont nous avons rapporté les résultats, 1°, que pour les métaux, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse de leurs poids atomiques; 2° qu'il en est de même pour les groupes de corps de même composition atomique et de constitution chimique semblable; 3° que la chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement égale à la moyenne de celles des métaux alliés.

58. *Chaleur spécifique des gaz.* La détermination de la chaleur spécifique des gaz présente beaucoup plus de difficultés que celle des corps solides et liquides, non-seulement parce qu'elle est très-petite, mais encore parce qu'on peut la considérer sous deux points de vue différents : 1° quand la pression reste la même et que le gaz, en s'échauffant, peut se dilater; 2° lorsque le volume est constant et que la force élastique augmente avec la température.

59. *Chaleur spécifique des gaz sous une pression constante.* Lorsque les gaz se dilatent librement par l'accroissement de température, c'est-à-dire qu'ils restent sous la même pression, la chaleur spécifique des gaz simples est la même, mais elle est différente pour les gaz composés. Le tableau suivant renferme les chaleurs spécifiques des principaux gaz rapportées à l'air et à l'eau, d'après les expériences de MM. Laroche et Berard.

*Chaleurs spécifiques de différents gaz sous une même pression.*

| NOMS DES GAZ. | LA CAPACITÉ CALORIFIQUE DE L'AIR étant prise pour unité. | | LA CAPACITÉ calorifique de l'eau étant prise pour unité. |
|---|---|---|---|
| | A VOLUMES ÉGAUX. | A POIDS ÉGAUX. | |
| Air atmosphérique..... | 1,0000 | 1,0000 | 0,2669 |
| Hydrogène..... | 0,9033 | 12,5401 | 3,2936 |
| Acide carbonique..... | 1,2583 | 0,8280 | 0,2210 |
| Oxygène..... | 0,9765 | 0,8848 | 0,2361 |
| Azote..... | 1,0000 | 1,0318 | 0,2754 |
| Oxyde d'azote..... | 1,3503 | 0,8878 | 0,2369 |
| Hydrogène carboné..... | 1,0530 | 1,5763 | 0,4207 |
| Oxyde de carbone..... | 1,0340 | 1,0805 | 0,2884 |
| Vapeur d'eau..... | 1,9600 | 3,1360 | 0,8470 |

60. La chaleur spécifique des gaz varie en sens contraire de la pression qu'ils supportent. D'après M. Suerman, la chaleur spécifique de l'air est 0,2868 et 0,3136 pour des pressions de $0^m,691$ et de $0^m,319$.

D'après M. Gay-Lussac, elle augmente avec la température, mais suivant une loi inconnue.

61. *Chaleur spécifique des gaz à volume constant.* Lorsque l'on échauffe les gaz sans leur permettre de se dilater, à volume égal, les chaleurs spécifiques des gaz simples sont encore égales, mais elles sont plus petites qu'à pression constante.

62. Le tableau suivant renferme le rapport des deux chaleurs spécifiques d'un certain nombre de gaz, et les chaleurs spécifiques à volume constant rapportées à celle de l'air.

| | RAPPORT DE LA CHALEUR spécifique à pression constante et à volume constant. | CHALEUR SPÉCIFIQUE à volume constant, celle de l'air étant prise pour unité. |
|---|---|---|
| Air atmosphérique..... | 1,421 | 1,000 |
| Oxygène..... | 1,415 | 1,000 |
| Hydrogène..... | 1,407 | 1,000 |
| Acide carbonique..... | 1,338 | 1,249 |
| Oxyde de carbone..... | 1,427 | 1,000 |
| Oxyde d'azote..... | 1,343 | 1,227 |
| Gaz oléfiant..... | 1,240 | 1,754 |

## § 8. — CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS.

*Température de la fusion de différents corps.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | DEGRÉS DU PYROMÈTRE. | DEGRÉS CENTÉSIMAUX. |
|---|---|---|
| Mercure | » | —39,0 |
| Essence de térébenthine | » | —10 |
| Glace | » | 0 |
| Suif | » | 33,33 |
| Acide acétique | » | 45 |
| Sperma-ceti | » | 49 |
| Stéarine | » | 40 à 43 |
| Acide margarique | » | 55 à 60 |
| Cire non blanchie | » | 61 |
| Cire blanche | » | 68 |
| Acide stéarique | » | 70 |
| Phosphore | » | 43 |
| Potassium | » | 58 |
| Sodium | » | 90 |
| Alliage de 5 plomb, 3 étain, 8 bismuth | » | 100 |
| — 2 plomb, 3 étain, 5 bismuth | » | 100 |
| Iode | » | 107 |
| Soufre | » | 109 |
| Alliage de 5 bismuth, 1 plomb, 4 étain | » | 118,9 |
| — 1 étain, 1 bismuth | » | 141,2 |
| — 3 étain, 2 plomb | » | 167,7 |
| — 2 étain, 1 bismuth | » | 167,7 |
| — 8 étain, 1 bismuth | » | 200 |
| Étain | » | 210 |
| Bismuth | » | 256 |
| Plomb | » | 260 |
| Zinc | » | 360 |
| Antimoine | » | 432 |
| Cuivre | 27 | » |
| Or | 32 | » |
| Cobalt | 130 | » |
| Acier | 130 | » |
| Fer | 130 | » |

| NOMS DES SUBSTANCES. | DEGRÉS DU PYROMÈTRE. | DEGRÉS CENTÉSIMAUX. |
|---|---|---|
| Nickel | 160 | » |
| Manganèse | 160 | » |
| Colombium | 170 | » |
| Molybdène | 170 | » |
| Chrome | 170 | » |
| Tungstène | 170 | » |
| Argent pur | » | 999 |
| Argent allié avec 1/10 d'or | » | 1048 |

63. Les corps solides, en passant à l'état liquide, absorbent une certaine quantité de chaleur nécessaire à la constitution de l'état liquide, et qui se dégage lorsque le liquide se solidifie. Le tableau suivant renferme la quantité d'unités de chaleur absorbées par 1$^{k}$ de différents corps en se liquéfiant.

| | TEMPÉRATURE DE LA FUSION. | UNITÉS DE CHALEURS ABSORBÉES. |
|---|---|---|
| Glace | 0 | 75 |
| Sperma-ceti | 56 | 82,22 |
| Cire d'abeilles | 60 | 97,22 |
| Étain | 219 | 277,77 |

L'eau, le bismuth et la fonte de fer augmentent de volume par la congélation.

64. L'ébullition d'un liquide a lieu quand la force élastique de la vapeur que le liquide produirait dans le vide à cette température, fait équilibre à la pression qui est exercée sur lui. Ainsi on abaisse la température de l'ébullition d'un liquide en diminuant la pression qu'il supporte, et on l'élève en augmentant cette pression. Dans un vase exactement fermé, d'une résistance suffisante, l'ébullition d'un liquide ne se ma-

nifesterait pas malgré l'élévation de la température, à cause de la pression croissante de l'atmosphère de vapeur qui pèserait sur lui.

65. Dans les mêmes circonstances, la température de l'ébullition de l'eau est plus élevée de 1 à $1°\frac{1}{2}$ dans des vases de verre que dans les vases métalliques. Dans le verre, certains liquides ne bouillent que par intermittences, malgré la continuité du feu. Les mouvements brusques qui accompagnent alors la production de la vapeur (soubresauts), occasionnent souvent la rupture des vases; on les évite en mettant dans les vases des limailles métalliques.

Les liquides versés sur des métaux incandescents s'évaporent très-lentement, beaucoup moins que si les métaux étaient à une température inférieure à celle du rouge naissant; il paraît qu'alors le liquide ne touche pas le métal, qu'il ne reçoit pas de chaleur par communication directe, et qu'il n'absorbe qu'une très-petite quantité de chaleur rayonnante.

*Température de l'ébullition de différents liquides sous la pression ordinaire.*

| | |
|---|---|
| Éther sulfurique | 37°,8 |
| Sulfure de carbone | 47,0 |
| Alcool | 79,7 |
| Dissolution saturée de sulfate de soude | 100,7 |
| — d'acétate de plomb | 102,0 |
| — de chlorure de sodium | 106,9 |
| — de chlorhydrate d'ammoniaque | 114,4 |
| — de nitre | 115,6 |
| — de tartre | 116,7 |
| — de nitrate d'ammoniaque | 125,3 |
| — de sous-carbonate de potasse | 140,0 |
| Essence de térébenthine | 157,0 |
| Phosphore | 290,0 |
| Soufre | 299,0 |
| Acide sulfurique | 310,0 |
| Huile de lin | 316,0 |
| Mercure | 360,0 |

66. Les liquides, en se transformant en vapeur, absorbent une certaine quantité de chaleur qui reste latente dans la vapeur, et qui est restituée quand la vapeur se condense.

*Chaleur latente des vapeurs d'après M. Despretz.*

| NOMS DES SUBSTANCES. | CHALEUR totale depuis 0°. | CHALEUR latente. | CHALEUR totale en eau. | DENSITÉ par rapport à celle de l'air à la même température. | DENSITÉ de la vapeur au point d'ébullition par rapport à l'air à 0°. |
|---|---|---|---|---|---|
| Eau..... | 631 | 531 | 631 | 0,623 | 0,454 |
| Alcool..... | 410,7 | 331,9 | 255 | 1,613 | 1,258 |
| Éther sulfurique... | 210 | 174,5 | 109,3 | 2,586 | 2,280 |
| Essence de térébent. | 323 | 166,2 | 149,2 | 5,013 | 3,207 |

67. D'après le comte de Rumfort, la chaleur de vaporisation de 1 kil. d'eau est de 557 unités de chaleur; d'après Dulong, de 543; d'après Clément et Desormes, de 550; d'après M. Southern, de 530; d'après Watt, de 527.

68. Suivant Clément et Desormes, la quantité totale de chaleur nécessaire pour chauffer et vaporiser ensuite à une température quelconque 1 kil. d'eau, primitivement à 0°, est égale à 650 unités de chaleur. Ainsi le calorique de vaporisation diminuerait à mesure que la température de la vaporisation serait plus élevée ; il serait de 550 à 100°, et nul à 650°; mais la quantité totale de chaleur renfermée dans la vapeur serait constante; c'est-à-dire, si on condensait 1 kil. de vapeur à une température quelconque, de manière à obtenir de l'eau à 0°, il se dégagerait toujours la même quantité de chaleur. D'après M. Southern, au contraire, le calorique de vaporisation serait constant, et par conséquent la quantité totale de chaleur renfermée dans la vapeur croîtrait avec sa température. Aucun de ces deux résultats n'est appuyé sur un nombre suffisant d'expériences pour être admis.

69. D'après M. de Pambour, la loi de Clément est la seule qui soit admissible. En effet, il résulte de cette loi, que si on dilatait et si on comprimait de la vapeur saturée dans un vase, sans absorption et sans perte de chaleur, dans le premier cas la vapeur se refroidirait, dans le second elle s'échaufferait, et dans tous elle resterait saturée, sans condensation. Or, il résulte des expériences de M. de Pambour, qu'en observant la tension et la température de la vapeur dans les générateurs des locomo-

tives, et à la sortie des cylindres, les pressions sont toujours celles qui correspondent dans les tables aux températures observées. Mais les expériences de M. de Pambour ont été faites dans de trop petites limites de pression pour qu'on puisse être assuré que la loi qu'il a reconnue se vérifierait dans toutes les circonstances.

## § 9. — SOURCES DE CHALEUR ET DE FROID.

70. Les sources de chaleur sont, la chaleur solaire, la chaleur centrale de la terre, la pression, la percussion, le frottement, les changements d'état des corps, et les actions chimiques. Nous ne parlerons pas de la chaleur solaire et de la chaleur centrale de la terre, parce qu'elles sont étrangères à notre objet. Nous ne parlerons pas non plus de celle qui est due à la pression, à la percussion ou au frottement, parce que les effets qui résultent de ces causes sont peu importants. Nous avons déjà parlé des effets produits par les changements d'état des corps. Quan aux actions chimiques, les seules qui soient employées pour produire de la chaleur, sont celles qui constituent la combustion, et nous y consacrerons tout le deuxième chapitre de cet ouvrage.

71. Les sources de froid résident dans la dilatation des gaz, dans la liquéfaction des corps solides par des actions chimiques, et enfin dans la vaporisation spontanée. Nous nous contenterons de rapporter le tableau des effets produits par différents mélanges frigorifiques.

### TABLE DES MÉLANGES FRIGORIFIQUES.

*Mélanges d'eau et de sels.*

| | Parties. | | Froid produit. |
|---|---|---|---|
| Eau | 16 | | |
| Nitre | 5 | de + 10° à — 12° | 22° |
| Hydrochlorate d'ammoniaque | 5 | | |
| Eau | 16 | | |
| Hydrochlorate d'ammoniaque | 5 | de + 10 à — 16 | 26 |
| Nitre | 5 | | |
| Sulfate de soude | 8 | | |
| Eau | 1 | de + 10 à — 16 | 26 |
| Nitrate d'ammoniaque | 1 | | |

| | Parties. | | Froid produit. |
|---|---|---|---|
| Eau | 1 | | |
| Nitrate d'ammoniaque | 1 | de +10 à — 19 | 29 |
| Sous-carbonate de soude | 1 | | |
| Eau | 4 | | |
| Chlorure de potassium | 57 | | |
| Chlorhydrate d'ammoniaque | 32 | | 15 |
| Nitrate de potasse | 20 | | |

*Mélanges de glace et de sels.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Neige ou glace pilée | 2 | | |
| Sel | 1 | | 20° |
| Neige ou glace pilée | 5 | | |
| Sel marin | 2 | | 24 |
| Sel ammoniac | 1 | | |
| Neige ou glace pilée | 24 | | |
| Sel marin | 10 | | |
| Sel ammoniac | 5 | | 28 |
| Nitre | 5 | | |
| Neige ou glace pilée | 12 | | |
| Sel marin | 5 | | 31 |
| Nitrate d'ammoniaque | 5 | | |

*Mélanges d'acides et de sels.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sulfate de soude | 3 | | |
| Acide nitrique étendu | 2 | de +10° à — 19° | 29° |
| Sulfate de soude | 6 | | |
| Sel ammoniac | 4 | | |
| Nitre | 2 | de +10 à — 23 | 33 |
| Acide nitrique étendu | 4 | | |
| Sulfate de soude | 6 | | |
| Nitrate d'ammoniaque | 5 | de +10 à — 26 | 36 |
| Acide nitrique étendu | 4 | | |
| Phosphate de soude | 9 | | |
| Acide nitrique étendu | 4 | de +10 à — 29 | 39 |
| Sulfate de soude | 20 | | |
| Acide sulfurique à 36° | 16 | de +10 à — 8,15 | 18,15 |
| Sulfate de soude | 22 | | |
| Résidu d'éther à 33° | 17 | de +10 à — 8 | 18 |
| Sulfate de soude | 8 | | |
| Acide chlorhydrique | 5 | de +10 à — 17 | 27 |

## § 10. — DENSITÉ.

72. Pour les corps solides et les liquides, la densité est égale au rapport du poids du corps à celui d'un égal volume d'eau à 4°. Pour ces corps, le poids, le volume et la densité sont liés par l'équation

$$P = Vd$$

dans laquelle l'unité du poids est égale au poids de l'eau renfermée dans l'unité de volume.

*Tableau de la densité d'un certain nombre de corps solides et liquides.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Platine laminé | 22,0690 | Porcelaine de la Chine | 2,3847 |
| — passé à la filière | 21,0417 | Chaux sulfatée cristallisée | 2,3117 |
| — forgé | 20,3366 | Porcelaine de Sèvres | 2,1457 |
| — purifié | 19,5000 | Soufre natif | 2,0332 |
| Or forgé | 19,3617 | Ivoire | 1,9170 |
| Or fondu | 19,2581 | Albâtre | 1,8740 |
| Mercure à 0° | 13,5980 | Anthracite | 1,8000 |
| Plomb fondu | 11,3523 | Alun | 1,7200 |
| Argent fondu | 10,4743 | Houille compacte | 1,3292 |
| Bismuth fondu | 9,8220 | Jayet | 1,2590 |
| Cuivre en fil | 8,8785 | Succin | 1,0780 |
| Cuivre rouge fondu | 8,7880 | Glace fondante | 0,9300 |
| Arsenic | 8,3080 | Potassium | 0,8651 |
| Nickel fondu | 8,2790 | Bois de hêtre | 0,8520 |
| Acier non écroui | 7,8163 | Frêne | 0,8450 |
| Cobalt fondu | 7,8119 | If | 0,8070 |
| Fer en barre | 7,7880 | Bois d'orme | 0,8000 |
| Étain fondu | 7,2914 | Pommier | 0,7330 |
| Fer fondu | 7,2070 | Bois d'oranger | 0,7050 |
| Zinc fondu | 6,8610 | Sapin jaune | 0,6570 |
| Antimoine fondu | 6,7120 | Tilleul | 0,6040 |
| Spath pesant | 4,4300 | Bois de cyprès | 0,5980 |
| Flint-glass | 3,3293 | Bois de cèdre | 0,5610 |
| Spath fluor | 3,1911 | Peuplier blanc d'Espagne | 0,5290 |
| Tourmaline (verte) | 3,1555 | Bois de sassafras | 0,4820 |
| Asbeste roide | 2,9958 | Peuplier ordinaire | 0,3830 |
| Marbre de Paros | 2,8376 | Liége | 0,2400 |
| Chaux carbonatée cristallisée | 2,7182 | Acide sulfurique | 1,8409 |
| Cristal de roche pur | 2,6530 | Acide nitreux | 1,550 |
| Quartz agate | 2,6150 | Eau de la mer Morte | 1,2403 |
| Feldspath limpide | 2,5644 | Acide nitrique | 1,2175 |
| Verre de Saint-Gobain | 2,4882 | Eau de la mer | 1,0263 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Lait | 1,03 | Éther chlorhydrique | 0,874 |
| Eau distillée | 1,0000 | Huile essentielle de térébenthine | 0,8697 |
| Vin de Bordeaux | 0,9993 | Bitume liquide, dit naphte | 0,8475 |
| Vin de Bourgogne | 0,9915 | Alcool absolu | 0,792 |
| Huile d'olive | 0,9153 | Éther sulfurique | 0,7155 |

73. Pour les gaz, l'unité de densité est la densité de l'air, et on a aussi la formule $P = Vd$; mais l'unité de poids est le poids de l'unité de volume de l'air.

*Tableau de la densité des principaux gaz.*

| DÉSIGNATION DES GAZ. | DENSITÉ. | POIDS en grammes d'un litre de gaz à 0° et sous la pression de $0^m76$. |
|---|---|---|
| Air | 1,000 | 1,2991 |
| Acide iodhydrique | 4,443 | 6,7719 |
| — fluo-silicique | 3,5735 | 4,6423 |
| — chloro-carbonique | | 4,4156 |
| Chlore | 2,470 | 3,2088 |
| Euchlorine | | 3,0081 |
| Acide fluo-borique | 2,3709 | 3,0800 |
| — sulfureux | 2,1204 | 2,8489 |
| — chloro-cyanique | | |
| Cyanogène | 1,8064 | 2,3467 |
| Protoxyde d'azote | 1,5204 | 1,9752 |
| Acide carbonique | 1,524 | 1,9805 |
| — chlorhydrique | 1,2474 | 1,6205 |
| — sulfhydrique | 1,1912 | 1,5475 |
| — oxygène | 1,1036 | 1,4323 |
| Bioxyde d'azote | 1,0388 | 1,3495 |
| Gaz oléfiant | 0,978 | 1,2752 |
| Azote | 0,976 | 1,2675 |
| Oxyde de carbone | 0,9569 | 1,2451 |
| Hydrogène phosphoré | 0,87 | |
| Ammoniaque | 0,5967 | 0,7752 |
| Hydrogène carboné | 0,555 | 0,7270 |
| Hydrogène arsénié | 0,529 | |
| Hydrogène | 0,0688 | 0,0894 |

# CHAPITRE II.

## DE LA COMBUSTION ET DES COMBUSTIBLES.

### § 1. DE LA COMBUSTION EN GÉNÉRAL.

74. La combustion réside uniquement dans le fait de la combinaison d'un corps avec l'oxygène; ce phénomène est souvent accompagné de chaleur et de lumière, mais il ne l'est pas toujours.

75. L'oxygène est un corps gazeux, incolore, mais pesant, élastique, et jouissant de toutes les propriétés de l'air atmosphérique, dont il forme un des éléments. L'air est composé de soixante-dix-neuf parties d'azote, et de vingt et une d'oxygène. L'azote ne joue qu'un rôle passif dans les phénomènes de la combustion; pour cette raison, nous n'en décrirons point les propriétés, dont la connaissance n'est point nécessaire pour l'objet que nous nous proposons.

76. L'oxygène jouit de la propriété remarquable de se combiner avec tous les corps simples, et avec un grand nombre de corps composés. Tous ces corps portent alors le nom de combustibles.

77. L'affinité des différents corps combustibles pour l'oxygène est extrêmement variable; il en est qui l'absorbent à la température ordinaire, d'autres exigent une température plus ou moins élevée; d'autres enfin ne peuvent se combiner avec l'oxygène que lorsqu'il sort d'une combinaison solide ou liquide. On désigne cet état passager sous le nom de gaz naissant.

78. L'oxygène peut être mis en contact avec un corps combustible, de bien des manières différentes; car ce corps existe non-seulement dans l'air, mais dans un grand nombre d'autres substances. On peut pro-

duire la combustion des corps par l'air, par l'oxygène pur ou mêlé avec d'autres gaz, et même par des combinaisons solides ou liquides qui contiennent de l'oxygène. Dans tous les cas, il se forme toujours une combinaison du corps combustible et d'oxygène. Quand la combustion d'un corps a lieu dans l'air, c'est ce dernier qui fournit l'oxygène nécessaire; si la masse d'air dans laquelle s'opère la combustion est petite relativement à celle du combustible, elle s'épuise bientôt, et cesse d'alimenter la combustion; aussi est-il nécessaire de renouveler continuellement l'air qui doit produire ce phénomène. Quand un métal est dissous par un acide, le métal éprouve une véritable combustion, et c'est l'acide ou l'eau qui, en se décomposant, fournissent l'oxygène nécessaire. Enfin, dans la détonation de la poudre, les matières combustibles qu'elle renferme, le soufre et le charbon, éprouvent encore une combustion réelle, pour laquelle l'oxygène est fourni par le salpêtre.

79. Il résulte évidemment de ce qui précède, que le produit de la combustion doit être plus pesant que le corps combustible, de tout l'oxygène absorbé. Mais les produits de la combustion peuvent être solides ou gazeux. Dans le premier cas, le résidu de la combustion en est tout le produit, et on reconnaît facilement qu'il y a augmentation de poids. Dans le second cas, les produits se dégagent à mesure qu'ils se forment, et le résidu est uniquement formé des substances incombustibles qui existaient dans la matière qui a été brûlée. C'est ainsi, par exemple, qu'en brûlant du plomb dans un vase d'argile ou de fonte, on obtient pour produit une matière grise beaucoup plus pesante que le plomb employé; et qu'au contraire dans la combustion du bois ou du charbon, il ne reste pour résidu que les matières étrangères qui étaient contenues dans ces combustibles. Ainsi, il faut bien distinguer les produits des résidus de la combustion. Les produits sont des combinaisons d'oxygène et des corps combustibles, dont le poids excède toujours celui de ces derniers, mais qui restent avec le résidu, ou se dégagent suivant qu'ils sont solides ou gazeux.

80. Nous avons déjà dit que la chaleur et la lumière accompagnent ordinairement la combustion. Il paraît qu'en général la lumière ne commence à se manifester qu'autant que la température du corps est au moins à 500°. A cette température la lumière est d'un rouge obscur à peine visible; mais à mesure que la température augmente, la lumière

prend plus d'éclat, elle devient rouge-cerise, et presque complétement blanche à une température très-élevée.

81. Lorsqu'un combustible est solide, et reste tel quelle que soit sa température, pendant toute la durée de la combustion, ce phénomène n'a lieu qu'à la surface du combustible, et cette surface seule est lumineuse. L'air environnant, quoique soumis à une température très-élevée, n'est point lumineux, parce que les gaz ne sont point susceptibles de le devenir par une chaleur communiquée, quelque grande qu'elle soit. Ils ne le deviennent que quand ils sont eux-mêmes combustibles et qu'ils brûlent. Ainsi, le charbon privé d'autres matières combustibles n'est lumineux qu'à sa surface. La flamme qu'il produit ordinairement, du moins au commencement de sa combustion, provient d'une certaine quantité d'hydrogène, qu'il renferme toujours quand il n'a pas été soumis, lors de sa formation, à une température assez élevée, et en outre, à l'eau que le charbon absorbe par son contact avec l'air, et qui se décompose à une haute température.

82. Mais si le corps combustible est susceptible de se réduire en vapeur à une température inférieure à celle qui se développe dans la combustion, la combustion aura lieu sur la vapeur elle-même. Le lieu de la combustion sera un espace situé au-dessus du combustible, car toutes ces vapeurs, à la température élevée à laquelle elles se trouvent, sont plus légères que l'air. Cet espace lumineux aura une forme qui dépendra à la fois de la forme et de la vitesse du courant de vapeur et du courant d'air. Si le corps combustible, au lieu de se réduire en vapeurs, se décompose et dégage des gaz combustibles, comme, par exemple, le bois, la houille, les huiles, ces gaz en brûlant donneront lieu au même phénomène.

83. Le lieu de la combustion d'un gaz est l'enveloppe de la flamme. Il est facile de reconnaître par l'expérience, que c'est réellement la combustion des gaz qui se dégagent des corps combustibles qui la produit. En effet, si on éteint une chandelle de manière que la mèche conserve encore quelques points en ignition, il se dégage un filet de fumée épaisse et très-odorante; si on approche un corps enflammé de cette fumée, elle s'enflamme, et la combustion se propage rapidement de haut en bas jusqu'à la mèche, la flamme de la chandelle redevient ce qu'elle était d'abord, et la fumée cesse. On peut même brûler cette fumée à une

certaine distance de la mèche, et empêcher la combustion de se propager jusqu'à elle; pour cela, il suffit de placer une toile métallique un peu au-dessus de la mèche, et d'enflammer le gaz qui passe à travers; la toile métallique intercepte la flamme, et on obtient ainsi une flamme et de la fumée au-dessous. Mais pour produire cet effet, il faut que le tissu soit d'autant plus serré que le gaz dont on veut arrêter la flamme est plus combustible. Cette propriété singulière des toiles métalliques a été attribuée par Davy au refroidissement qu'elles produisent dans la flamme. Mais M. Libri regarde comme beaucoup plus probable qu'elle résulte d'une véritable répulsion qui s'exerce entre les corps échauffés.

84. La flamme n'est lumineuse qu'à sa surface, parce que c'est là seulement que le gaz combustible est en contact avec l'air; c'est d'ailleurs ce dont il est facile de s'assurer en plaçant une toile métallique en travers de la flamme d'une chandelle; le tissu métallique intercepte la flamme, et en regardant au-dessus de la toile, on voit la partie centrale de la flamme complétement noire.

85. La longueur de la flamme est le chemin parcouru par une tranche transversale du gaz, pendant que la combustion se propage de la circonférence au centre de cette tranche. Elle a évidemment d'autant plus d'étendue, que l'air se renouvelle avec moins de vitesse. On peut reconnaître l'influence de la vitesse du courant d'air sur l'étendue de la flamme au moyen d'une lampe à cheminée; si on augmente la longueur de la cheminée avec un cylindre de papier de même diamètre, circonstance qui augmente la vitesse du courant d'air, la hauteur de la flamme diminue; si on diminue la longueur de la cheminée ou si on rétrécit son ouverture, circonstances qui diminuent la vitesse du courant, la flamme s'allonge. Il résulte de là une conséquence très-importante dans les arts : on peut, à volonté, allonger ou raccourcir la flamme d'un foyer, en diminuant ou en augmentant le tirage.

86. Lorsque des gaz combustibles partent d'une très-grande surface d'un corps en ignition, ils ne peuvent jamais brûler complétement, du moins quand on n'emploie pas un moyen quelconque pour augmenter la vitesse du courant d'air, parce que la partie centrale de la colonne de gaz se trouve à une température trop basse lorsqu'elle arrive à la distance à laquelle elle est en contact avec l'air. C'est pourquoi, jusqu'à la découverte d'Argant, on ne pouvait employer dans

les lampes que des mèches d'un très-petit diamètre, et par suite qu'on ne pouvait obtenir que des foyers de faible intensité. Mais avec l'emploi des becs annulaires, simples ou multiples, à cheminées, dans lesquels l'air est appelé à l'intérieur et à l'extérieur de la mèche et où la vitesse du courant se trouve accélérée par le tirage de la cheminée, on est parvenu à obtenir des foyers d'une intensité quelconque, une combustion sans fumée et un effet utile des huiles beaucoup plus grand que dans les anciens appareils.

87. La flamme se dirige naturellement verticalement de bas en haut, à cause de la haute température des gaz, avant, pendant et après la combustion; mais cette direction est modifiée par celle du courant d'air; la flamme peut être inclinée d'une manière quelconque à l'horizon; elle peut être rendue horizontale, et même dirigée de haut en bas.

88. La combustion des corps gazeux produit une température beaucoup plus élevée que celle des corps solides; c'est ce que l'on peut déduire de la couleur et de l'éclat de la flamme, éclat que l'on ne peut produire sur les corps solides que par une combustion alimentée par un courant d'air forcé, ou par l'oxygène pur. On peut d'ailleurs s'assurer directement de ce fait en plongeant dans la flamme des corps solides d'une petite dimension; ils prennent un éclat qui ne peut être produit que par une température extrêmement élevée.

89. Les gaz, pour s'enflammer, exigent une température plus ou moins élevée, suivant leur nature. Il en est qui s'enflamment dans l'air à la température ordinaire : tel est le gaz anciennement connu sous le nom d'hydrogène perphosphoré. D'autres exigent une température plus élevée que le rouge-cerise : tels sont la plupart des gaz et des vapeurs produites par les combustibles employés dans le chauffage et l'éclairage: tout le monde sait en effet qu'un corps au rouge-cerise ne peut pas allumer la fumée d'une lampe, d'une chandelle, du bois, etc.

90. Quand la combustion est complète, la quantité de chaleur dégagée, comme nous le verrons plus tard, est toujours la même pour la même quantité du même combustible, quelles que soient les circonstances de la combustion; elle est la même quand la combustion s'effectue avec de l'air, sous une pression plus grande ou plus petite que celle de l'atmosphère, quand l'oxygène est en quantité plus ou moins grande dans l'air, et même quand la combustion a lieu dans l'oxygène

pur. Mais elle varie d'un combustible à un autre. La lumière, au contraire, pour le même combustible et la même consommation dans le même temps, varie avec les circonstances qui accompagnent la combustion et surtout avec la vitesse du courant d'air.

91. Pour que la flamme d'un même gaz combustible soit la plus brillante possible, il faut que sa température soit très-élevée, et par conséquent que le courant d'air qui alimente la combustion soit très-rapide; mais à mesure qu'elle augmente d'éclat elle perd en étendue, et comme cette diminution est plus grande que l'augmentation d'éclat de chaque point, sa faculté éclairante diminue. Il y a dans chaque cas particulier une vitesse du courant d'air qui donne le maximum de pouvoir lumineux; c'est celle qui amène sur la flamme une quantité d'air seulement suffisante pour effectuer complétement la combustion.

92. Pour qu'une flamme soit très-brillante, il faut qu'elle renferme des matières solides d'une manière quelconque; il faut, ou qu'il y ait des corps solides en permanence, ou que le gaz, avant de brûler, en dépose, ou enfin que le produit de la combustion soit solide. Toutes les combustions de gaz qui ne satisfont pas à l'une ou à l'autre de ces conditions, ont lieu avec une faible lumière. Ainsi, la combustion de l'hydrogène pur ou du soufre donne une flamme peu brillante, parce que le produit de la combustion de l'hydrogène est de la vapeur d'eau, et que celle du soufre est de l'acide sulfureux gazeux. Mais les flammes du phosphore, de l'arsenic, de l'hydrogène carboné, ont un grand éclat; parce que la combustion des deux premiers produit des corps solides, et que celle de l'hydrogène carboné est précédée d'un dépôt de charbon.

La nécessité de la présence des corps solides dans les flammes pour qu'elles soient brillantes, provient de ce que les gaz ne sont lumineux qu'à une température beaucoup plus élevée que les corps solides.

93. Nous n'entrerons pas maintenant dans de plus grands développements sur la combustion; mais en parlant de chacun des combustibles qui sont employés dans les arts, nous étudierons les circonstances particulières que présente leur combustion, ainsi que les produits qu'elle fournit.

## § 2. — DES COMBUSTIBLES EN GÉNÉRAL, ET DES MÉTHODES EMPLOYÉES POUR DÉTERMINER LEUR PUISSANCE CALORIFIQUE ET LEUR POUVOIR RAYONNANT.

94. Les combustibles sont très-nombreux, car cette grande classe de corps renferme, non-seulement tous les corps simples, mais encore un grand nombre de corps composés. Cependant ceux qui sont en usage dans les arts pour produire de la chaleur sont très-peu nombreux, parce que pour être employés ils doivent satisfaire à plusieurs conditions importantes, qui en excluent un grand nombre.

95. 1° Ils doivent être facilement brûlés dans l'air atmosphérique, et la chaleur dégagée par la combustion doit être suffisante pour la maintenir; ou, en d'autres termes, la chaleur dégagée par la combustion doit être supérieure à celle qui est nécessaire pour la produire. Le soufre, le charbon, l'hydrogène, le phosphore, satisfont à cette condition; mais, le fer, le plomb, quoique très-combustibles, n'y satisfont point, car, lorsque ces métaux sont en ignition, si on les enlève du foyer où il a été nécessaire de les placer, la combustion s'arrête. Il est probable que cet effet est dû à ce que le corps brûlé qui se forme, étant solide, forme autour du métal une croûte qui le soustrait au contact de l'air; cette raison devient plus vraisemblable encore, lorsqu'on considère que dans l'oxygène pur, où la combustion du fer se soutient, la température est assez élevée pour fondre et faire couler l'oxyde de fer à mesure qu'il se forme. Quoi qu'il en soit, il y a des corps très-combustibles dans lesquels la combustion ne se propage pas d'elle-même dans les circonstances ordinaires, et ceux-là ne peuvent être d'aucune utilité pour produire dans les arts de la chaleur ou de la lumière. 2° Ils doivent être abondants, et leurs prix ne doivent point être trop élevés. 3° Enfin, les produits de la combustion doivent être de nature à ne point altérer les corps qui reçoivent l'action de la chaleur, et à ne pas porter dans l'air des gaz ou des vapeurs qui pourraient avoir une action nuisible sur l'économie animale ou végétale.

96. Le carbone et l'hydrogène sont les seuls corps simples qui remplissent ces différentes conditions; aussi les seules matières combustibles en usage sont celles dont ces deux corps forment les principaux éléments.

97. Les combustibles généralement employés sont :
Le bois,
Le charbon de bois,
La tannée,
La tourbe,
Le charbon de tourbe,
La houille,
Le coke.

98. Nous désignerons désormais sous le nom de *puissance calorifique* d'un combustible, la quantité d'unités de chaleur (57) qu'un kilogramme de ce corps développe par sa combustion; nous avons déjà dit (90) que pour le même combustible, cette quantité est constante, quelles que soient les circonstances de la combustion.

99. Dans certains cas, la nature du combustible qui peut être employé se trouve fixée par certaines conditions à remplir; d'autres fois, on n'en a qu'un seul à sa disposition. Mais, le plus souvent, on peut en employer plusieurs. Dans tous les cas, il est important de connaître leurs puissances calorifiques, pour déterminer la quantité qu'on doit en employer pour produire l'effet demandé et pour calculer les dimensions des appareils; et dans le cas général où l'on peut employer plusieurs espèces de combustibles, c'est la connaissance de leurs puissances calorifiques qui, combinée avec leur prix, sert à déterminer celui qui est réellement à meilleur marché.

100. *Méthodes employées pour déterminer la puissance calorifique des combustibles.* Rumfort est le premier physicien qui se soit occupé de la détermination de la puissance calorifique des combustibles; l'appareil dont il s'est servi et qui porte encore le nom de calorimètre de Rumfort, consiste en une caisse de cuivre rouge de peu de hauteur, au fond de laquelle circule un tuyau qui, par une extrémité, communique avec un entonnoir renversé placé au-dessous de la caisse, et par l'autre, avec un tuyau vertical qui s'élève à une certaine hauteur. Pour se servir de cet appareil, on remplit la caisse d'eau à une certaine température, et on fait passer dans le serpentin la fumée du combustible que l'on brûle sous l'entonnoir; alors, connaissant le poids du combustible brûlé, le poids de l'eau renfermée dans la caisse, son accroissement de température, et le poids de la caisse, on peut en dé-

duire la quantité de chaleur développée par un poids donné du combustible. Supposons, par exemple, que la quantité de combustible consommé soit de 10 grammes, le poids de l'eau de 10 kilogrammes, celui de la caisse de 1 kilogramme, et enfin l'élévation de température de 5°. Comme la chaleur spécifique du cuivre est 0,0949, la quantité de chaleur absorbée par la caisse sera égale à celle qui aurait été prise par un même poids d'eau multiplié par 0,0949; ainsi la chaleur dégagée a élevé de 5 degrés un poids d'eau égal à $10^k + 1 \times 0{,}0949 = 10{,}0949$, et pourrait élever d'un degré $10{,}0949 \times 5 = 50{,}4745$ kilogrammes d'eau, et par conséquent la puissance calorifique du combustible serait égale à $50{,}47 \times \frac{1000}{10} = 5047$.

101. L'emploi du calorimètre de Rumfort, indépendamment de la correction relative à la masse de l'appareil et au refroidissement pendant l'opération, exigerait encore deux autres corrections : l'une relative à la quantité de chaleur entraînée par les gaz qui sortent du serpentin; l'autre à celle qui est perdue par le rayonnement du combustible, au-dessous de l'entonnoir sous lequel la combustion a lieu. Ces deux corrections sont importantes, et je ne pense pas qu'elles aient été faites, car la première exige, non-seulement la connaissance de la température de l'air à sa sortie, mais encore celle de la vitesse du courant, qui est assez difficile à déterminer; et pour effectuer la seconde, il faut connaître la quantité de chaleur que rayonnent les différents combustibles, et mesurer l'étendue du cône qui laisse dissiper le rayonnement. D'après cela, on peut considérer l'emploi du calorimètre de Rumfort, comme donnant des résultats trop faibles.

102. Laplace et Lavoisier ont fait aussi un grand nombre d'expériences au moyen du calorimètre qui porte le nom de ces deux hommes célèbres; la chambre intérieure était occupée par un serpentin qui communiquait d'un côté avec un entonnoir, sous lequel on brûlait le combustible, et de l'autre, avec un tube vertical qui servait de cheminée. Mais ce mode d'expérience est sujet à beaucoup d'erreurs. Hassenfratz a fait aussi quelques expériences avec le même appareil, et les résultats qu'il a obtenus attestent, par leur grande irrégularité, les vices de cette manière d'opérer.

103. Depuis, M. Despretz a fait sur quelques corps des expériences

plus exactes que celles qui avaient été faites avant lui. Il s'est servi du calorimètre de Rumfort, mais modifié de manière à éviter la perte de chaleur par le rayonnement du combustible, et assez grand pour que la température de l'eau, à la fin de la combustion, excédât seulement de 2° celle de l'air; par ce moyen on pouvait négliger la chaleur perdue par le refroidissement du vase pendant l'opération et la quantité de chaleur entraînée par l'air en sortant de l'appareil.

104. Marcus Bull a fait, en Amérique, il y a quelques années, de nombreuses expériences pour déterminer les rapports des puissances calorifiques des différents combustibles. Le bulletin de la Société d'encouragement, de 1827, renferme un extrait de son mémoire. Voici le procédé qu'il a employé. Son appareil consistait en une chambre en bois construite dans une chambre d'une maison d'habitation, de manière que toutes les faces de ces chambres fussent à la même distance; après avoir établi par la combustion dans un poêle d'une certaine quantité de charbon de bois une différence de 10° entre la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur de la petite chambre, il a déterminé le temps pendant lequel cette même différence était maintenue par la combustion d'un poids donné de différents combustibles. Cette méthode est bien compliquée, et renferme bien des causes d'erreurs; nous donnerons cependant les résultats obtenus, lorsque nous parlerons des différentes classes de combustibles.

105. Enfin, on a trouvé dans les papiers de M. Dulong, les résultats d'un grand nombre d'expériences sur la puissance calorifique d'un certain nombre de corps. Ces nombres ont été obtenus au moyen d'un appareil analogue à celui de Rumfort, décrit dans les comptes rendus des séances de l'Institut, tom. 7, par M. Gamard, ancien élève de l'école polytechnique; mais on ne connaît pas les détails des expériences.

106. Pour déterminer avec beaucoup plus de précision la puissance calorifique des combustibles, il faudrait employer un appareil analogue à celui de Rumfort, mais beaucoup plus grand, qui contiendrait, par exemple, plusieurs mètres cubes d'eau, et qui renfermerait un foyer disposé comme celui des chaudières à vapeur; on estimerait la puissance calorifique par le poids de l'eau évaporée, en corrigeant le résultat obtenu du refroidissement de l'enveloppe, et de la température de l'air brûlé à sa sortie. Cette méthode serait bien préférable à celles qui ont été em-

ployées, parce qu'on pourrait prolonger les expériences autant qu'on le voudrait, que le foyer étant intérieur il n'y aurait point de perte de chaleur par le rayonnement, et enfin parce qu'on pourrait opérer sur tous les combustibles employés dans les arts, même sur ceux qui ne brûlent qu'en grande masse. Mais nous verrons que ces expériences coûteuses ne sont pas nécessaires, et que la puissance calorifique des combustibles peut se déduire de leur composition, quand on connaît celle du carbone et celle de l'hydrogène.

107. *Chaleur rayonnée.* Lorsqu'un corps est en combustion, la chaleur se dissipe de deux manières différentes : 1° par le courant d'air qui se forme naturellement, soit que la combustion ait lieu dans l'air libre, soit qu'elle s'effectue dans un appareil fermé; 2° par le rayonnement.

Le courant d'air provient de la légèreté spécifique qu'acquiert l'air qui alimente la combustion. L'air en contact avec le corps incandescent s'échauffe, se dilate, devient spécifiquement plus léger que l'air environnant, et par conséquent doit s'élever; il est remplacé par de l'air neuf qui, après avoir alimenté la combustion, s'être échauffé, s'élève à son tour : ainsi la combustion détermine elle-même le courant d'air nécessaire à son alimentation. Quant à la seconde cause de déperdition de la chaleur développée par la combustion, elle est fondée sur une propriété générale de tous les corps échauffés.

Jusqu'ici, on a complétement négligé le rayonnement des corps combustibles, parce qu'on le regardait comme très-faible. Pour faire voir qu'en effet ce rayonnement ne dissipe qu'une très-petite quantité de chaleur, on a comparé la chaleur que l'on éprouve en approchant la main latéralement et verticalement de la flamme d'une chandelle; latéralement, on ne reçoit que la chaleur rayonnante; verticalement, que celle du courant d'air chaud; or comme, à des distances égales, la différence de température est énorme, on en a conclu que la dispersion de la chaleur par rayonnement est très-petite, du moins par rapport à celle qui est entraînée par l'air.

Cette expérience, qui paraît décisive au premier abord, ne peut pas conduire cependant à la conséquence qui est généralement admise. En effet, le courant d'air chaud ne se dégage que dans une seule direction, et son diamètre excède peu celui de la flamme, tandis que le rayonne-

ment a lieu dans tous les sens. Ainsi, pour avoir le rapport des quantités de chaleur dissipées par le courant d'air et par le rayonnement, il ne suffit pas de comparer la température du courant à celle qui est produite par le rayonnement à la même distance de la flamme, il faudrait multiplier cette dernière par le rapport de l'étendue de la sphère à celle du secteur intercepté par le courant d'air; il faudrait de plus, avoir égard à un grand nombre d'autres considérations, telles que la vitesse du courant, la capacité calorifique de l'air, etc. On voit d'après cela, que l'expérience dont il s'agit ne prouve rien pour le rayonnement de la flamme, et encore beaucoup moins pour celui des combustibles qui brûlent sans flamme.

108. Il était important de déterminer la quantité relative de chaleur qui se dissipe par le rayonnement, car c'est la chaleur rayonnante qui est seule utilisée dans nos cheminées domestiques, et il était bon de s'assurer si, comme plusieurs auteurs l'ont annoncé, on ne profite ainsi que de quelques centièmes de la chaleur dégagée par le combustible.

J'ai fait à ce sujet un grand nombre d'expériences sur le bois, le charbon de bois, la tourbe, le charbon de tourbe et les houilles, et je suis parvenu à des résultats fort opposés à ce qu'on croyait généralement. Les résultats seront rapportés, quand nous examinerons les différents combustibles en particulier; je décrirai seulement ici l'instrument que j'ai employé et la méthode d'observation.

L'appareil dont je me suis servi consiste (pl. I, fig. 1) en une caisse annulaire en fer-blanc ABCD *abcd;* l'espace compris entre les deux cylindres concentriques ABCD et *abcd* est fermé à la partie inférieure et à la partie supérieure; la paroi supérieure renferme deux tubulures *m* et *n*, destinées à recevoir deux thermomètres à longs réservoirs, dont les tiges passent à travers le bouchon de liége qui les ferme. Au centre du cylindre intérieur, qui est complétement ouvert par les deux extrémités, est suspendu un hémisphère en fil de fer, destiné à recevoir le combustible; l'intérieur du cylindre *abcd* est recouvert d'une couche mince de noir de fumée, et l'appareil est supporté par trois pieds.

Pour faire usage de cet appareil, on commence par remplir d'eau l'intervalle des deux cylindres; on place les thermomètres, et on introduit dans la grille M une quantité déterminée de combustible en ignition; une partie de la chaleur rayonnante est reçue par la paroi *abcd* du vase,

et passe dans l'eau. Lorsque la combustion est terminée, on observe, à l'aide des thermomètres, la température du liquide; alors, connaissant le poids de l'eau, celui de l'enveloppe métallique, on peut facilement calculer la quantité de chaleur rayonnante absorbée. Mais pour en déduire la quantité totale de chaleur rayonnante émise par le combustible, il faut évidemment déterminer le rapport entre la surface totale de la sphère, et celle du secteur annulaire circonscrit au cylindre *abcd,* car le vase n'a réellement absorbé que les rayons compris entre les droites qui joignent le centre de la sphère M avec tous les points des circonférences supérieure et inférieure du cylindre intérieur, et tous les rayons dirigés sur les calottes sphériques *ad* et *bc* ont échappé.

Ce dernier rapport est facile à déterminer. En effet, on sait que la portion de la surface de la sphère engendrée par un arc, est proportionnelle à sa projection sur l'axe de rotation; par conséquent la surface absorbante est à la surface totale de la sphère comme *gh* est à *ef* (fig. 2, pl. 1re).

Dans l'appareil dont je me suis servi $ad = 0^m,20$, $ab = 0^m,30$, d'où l'on déduit :

$$ef = 2Me = 2Ma = 2\sqrt{Mg^2 + ag^2} = 2\sqrt{(0,15)^2 + (0,10)^2} = 0,36; \text{ et } ab = 0,30.$$

Ainsi le rayonnement total est à celui qui est absorbé :: 36 : 30 ou :: 12 : 10. D'où il suit qu'il faudra multiplier la quantité de chaleur obtenue par $\frac{6}{5} = 1,20$, pour avoir la quantité totale de chaleur émise par rayonnement.

Il est évident que, pour éviter la perte de chaleur par les parois du vase, il faut employer le procédé de Rumfort, et placer dans le vase de l'eau dont la température soit au-dessous de celle de l'air atmosphérique, d'une quantité égale à celle dont elle sera élevée au-dessus à la fin de l'expérience.

109. Pour faire les expériences sur des combustibles liquides, tels que les huiles, j'ai employé l'appareil de combustion (pl. 1, fig. 3). Cet appareil est formé d'un réservoir à niveau constant, placé en dehors de l'appareil, qui alimente sept becs disposés circulairement sur un petit tuyau annulaire.

## § 3. DES BOIS.

110. Les bois sont formés, 1° d'une matière désignée par M. Payen sous le nom de *cellulose*, qui constitue la charpente solide de toutes les plantes; cette substance, qui a toujours la même composition chimique, est formée de 0,444 de carbone et de 0,556 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau; 2° d'une matière incrustante dont la composition est variable, suivant la nature des bois, mais qui est plus riche en carbone et qui renferme un petit excès d'hydrogène. Les bois de chauffage ordinaires parfaitement secs renferment rarement plus de 0,02 de matières étrangères.

111. La densité des bois est extrêmement variable, comme on peut le voir d'après le tableau suivant, dû à Brisson :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Grenadier | 1,35 | Cerisier | 0,75 |
| Gaïac, ébène | 1,33 | Oranger | 0,70 |
| Buis de Hollande | 1,32 | Coignassier | 0,70 |
| Chêne de 60 ans (le cœur) | 1,17 | Orme (le tronc) | 0,67 |
| Néflier | 0,94 | Noyer de France | 0,67 |
| Olivier | 0,94 | Poirier | 0,66 |
| Buis de France | 0,91 | Cyprès d'Espagne | 0,64 |
| Mûrier d'Espagne | 0,89 | Tilleul | 0,60 |
| Hêtre | 0,85 | Coudrier ou noisetier | 0,60 |
| Frêne (le tronc) | 0,84 | Saule | 0,58 |
| Aune | 0,80 | Thuya | 0,56 |
| If d'Espagne | 0,80 | Sapin mâle | 0,55 |
| Pommier | 0,79 | Sapin femelle | 0,49 |
| If de Hollande | 0,78 | Peuplier | 0,38 |
| Prunier | 0,78 | Peuplier blanc d'Espagne | 0,32 |
| Érable | 0,75 | Liége | 0,24 |

112. Le temps le plus favorable pour la coupe des bois est l'hiver; les bois coupés doivent rester sur place pendant l'été suivant, et ce n'est qu'en automne qu'ils peuvent être livrés à la consommation.

113. Lorsqu'un bois parfaitement sec est exposé dans une chambre où l'on ne fait pas de feu, en douze mois il absorbe une quantité d'eau équivalente à un dixième de son poids. Marcus-Bull, à qui l'on doit ce

résultat, a fait des expériences sur quarante-six espèces de bois : toutes ont donné le même résultat. Par un temps plus sec, l'absorption ne s'est élevée qu'à 8 pour cent. D'après cela, la quantité d'humidité que peuvent absorber les bois secs est entièrement indépendante de leur nature et de leur densité.

Les bois verts renferment des quantités d'eau assez inégales. D'après des expériences faites par Marcus-Bull, sur 100 parties de bois vert, par la dessiccation, le noyer perd 37,5; le chêne blanc, 41; l'érable, 48. Ainsi, il paraît que les bois renferment d'autant plus d'eau, qu'ils ont une plus faible densité. On peut estimer, terme moyen, à 42 pour 100 la quantité d'eau que renferment les bois verts, à 30 ou 35 celle que renferment les bois de 4 à 5 mois de coupe, qui sont employés au charbonnage dans les forêts, et seulement à 20 ou 25 celle que renferment les bois de chauffage ordinaires qui ont été exposés à l'air pendant 8 à 12 mois.

Une analyse directe des bois de charbonnage a donné les résultats suivants :

| | |
|---|---|
| Eau hygrométrique | 0,275 |
| Carbone | 0,375 |
| Oxygène et hydrogène | 0,338 |
| Cendres | 0,012 |

114. Sous le rapport de leur emploi comme combustibles, on divise les bois en deux classes. La première comprend les bois durs et compactes, ceux dont la pesanteur spécifique est la plus considérable; tels sont le chêne, le hêtre, l'orme et le frêne, etc. La seconde renferme les bois blancs, mous, légers; tels sont le pin, le sapin, le bouleau, le tremble et le peuplier, etc.

En France, on divise les bois de chauffage en bois neufs, bois flottés, et bois pelards. Le bois neuf est celui qui a été transporté au lieu de la consommation en voiture ou en bateau, le bois flotté celui qui a été transporté en trains flottants; enfin, le bois pelard n'est autre que le bois de chêne écorcé.

115. Les bois humides, sous le même poids, donnent beaucoup moins de chaleur que ceux qui sont secs, 1° parce que l'eau, n'étant point combustible, ne peut point développer de chaleur; 2° parce que

ce liquide en absorbe une grande quantité pour se réduire en vapeur. C'est le comte de Rumfort qui, le premier, a appelé l'attention sur le mauvais usage des bois humides.

Il est tellement avantageux d'employer des bois secs, que dans plusieurs espèces d'usines on ne se contente pas de n'admettre que des bois aussi secs qu'ils peuvent l'être naturellement par la dessiccation à l'air, on les fait encore sécher dans des étuves. Telles sont les verreries de verre fin et les fabriques de porcelaine. On emploie alors du bois pour produire la chaleur nécessaire à la dessiccation; mais il serait beaucoup plus avantageux d'utiliser, pour cet objet, une partie de la chaleur perdue dans les fours. Nous parlerons plus tard de la disposition qu'il faudrait employer.

D'après M. Héron de Villefosse, la production annuelle de la France, en bois de chauffage, est de 9,804,928 cordes, chacune de 2 stères $\frac{3}{4}$, qui représentent une valeur de 84,163,646 fr. Cette production représente à peu près 70,000,000 d'hectolitres ras de houille.

116. *Produits de la combustion.* Les produits de la combustion complète du bois sont uniquement formés de vapeur d'eau et d'acide carbonique. Mais quand la combustion n'est pas complète, il se dégage de la fumée qui est principalement formée d'eau, d'acide acétique, d'huile essentielle empyreumatique, et d'une matière analogue au goudron. C'est à l'acide acétique qu'est due l'excitation de la fumée sur les yeux.

L'acide carbonique est un gaz incolore, inodore, beaucoup plus lourd que l'air, incombustible et impropre à alimenter la combustion. Pendant la combustion, il s'élève dans l'atmosphère par la haute température qu'il possède.

117. Le tableau suivant, extrait d'un mémoire de M. Berthier (*Annales de Chimie*, tome 32), indique les quantités de cendres produites par différents bois.

*Quantités de cendres produites par différents bois et combustibles végétaux.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Chêne | 0,025 | Sureau à grappe | 0,0164 |
| Écorce de chêne | 0,0600 | Arbre de Judée | 0,0170 |
| Tilleul | 0,0500 | Noisetier | 0,0157 |
| Sainte-Lucie | 0,0160 | Mûrier blanc | 0,0160 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bouleau | 0,0100 | Paille de froment | 0,0440 |
| Faux ébénier | 0,0125 | Fanes de pomme de terre | 0,1500 |
| Sapin | 0,0083 | | |

*D'après M. de Saussure.*

| | | |
|---|---|---|
| De jeunes branches de chêne écorcées produisent | 0,004 | de cendres |
| Leur écorce | 0,060 | |
| Un tronc de chêne | 0,002 | |
| Son écorce | 0,060 | |

Nous remarquerons cependant, que les quantités de cendres données par un même bois varient suivant la nature du terrain, l'exposition, l'âge, et même suivant les différentes parties d'un même individu. En général, les plantes ligneuses en donnent moins que les plantes herbacées; les feuilles toujours vertes, moins que celles des arbres qui se dépouillent en hiver; le tronc de l'arbre en donne moins que les branches, les branches moins que les feuilles et l'écorce, et le cœur du bois moins que l'aubier.

118. *Puissance calorifique.* La cellulose et la matière incrustante se trouvant dans des proportions variables dans les différentes espèces de bois, il en résulte que tous les bois au même degré de dessiccation ne doivent pas produire exactement la même quantité de chaleur. Mais comme la différence de composition des bois de chauffage ordinaires est peu considérable, on peut regarder leurs puissances calorifiques comme étant sensiblement les mêmes. C'est ce qui résulte d'ailleurs des expériences directes faites par M. Berthier.

119. Rumfort, après lui Hassenfratz, et récemment Marcus-Bull, se sont beaucoup occupés de la détermination des quantités de chaleur qui résultent de la combustion des différentes espèces de bois. Rumfort s'est servi de l'appareil qui porte son nom, Hassenfratz du calorimètre à glace, et Marcus-Bull de l'appareil que nous avons décrit (104). Tous ont fait leurs expériences sur des poids égaux de bois à l'état ordinaire de dessiccation ou préalablement desséché.

Voici les principaux résultats obtenus par Rumfort : nous avons transformé les quantités de glace fondues en unités de chaleur.

*Table de la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un kilogramme de différentes espèces de bois.*

| ESPÈCES. | ÉTAT DANS LEQUEL ILS ONT ÉTÉ ESSAYÉS. | NOMBRE D'UNITÉS DE CHALEUR DÉVELOPPÉES. |
|---|---|---|
| Tilleul..... | bois sec de menuisier, de 4 ans..... | 3460 |
| *Idem*..... | bois fortement desséché dans un poêle..... | 3960 |
| Hêtre..... | bois sec de menuisier, de 4 ans..... | 3375 |
| *Idem*..... | bois fortement desséché dans un poêle..... | 3630 |
| Orme..... | bois sec de menuisier, de 4 à 5 ans..... | 3037 |
| *Idem*..... | bois fortement séché dans un poêle..... | 3450 |
| Chêne..... | bois à brûler ordinaire en copeaux moyens... | 2550 |
| *Idem*..... | en copeaux minces bien séchés à l'air..... | 2925 |
| Frêne..... | de menuiserie ordinaire sec..... | 3075 |
| *Idem*..... | fortement séché dans un poêle..... | 3525 |
| Érable..... | bois de la saison, fortement séché sur un poêle. | 3600 |
| Cormier.... | bois desséché sur un poêle..... | 3600 |
| Merisier.... | bois sec de menuisier..... | 3375 |
| *Idem*..... | bois séché sur un poêle..... | 3675 |
| Sapin..... | bois sec de menuisier, ordinaire..... | 3037 |
| *Idem*..... | en copeaux bien séchés à l'air..... | 3375 |
| *Idem*..... | bois fortement desséché sur un poêle..... | 3750 |
| Peuplier.... | bois sec de menuiserie, ordinaire..... | 3460 |
| *Idem*..... | fortement desséché dans un poêle..... | 3712 |
| Charme.... | bois sec de menuisier..... | 3187 |
| Chêne..... | sec..... | 3300 |

120. En prenant les expériences faites sur les bois préalablement desséchés, on trouve, pour la puissance calorifique moyenne, le nombre 3654; le bois de chêne à brûler ordinaire a donné 2550. Toutes les autres expériences faites sur des bois désignés sous le nom de bois secs, mais qui n'avaient pas été desséchés artificiellement, et qui renfermaient nécessairement des quantités variables d'eau, ont donné des résultats qui ne peuvent conduire à rien de positif. Il est bon de remarquer qu'en partant du nombre 3654, pour le bois sec, celui qui correspondrait au bois renfermant 25 pour cent d'eau serait 2740.

121. Hassenfratz a essayé 28 espèces de bois, au moyen du calori-

mètre à glace : les résultats extrêmes qu'il a obtenus sont, qu'un kilogramme de bois peut fondre de 32 à 49 kilogrammes de glace; et comme un kilogramme de glace, en fondant, absorbe 75 unités de chaleur, les limites extrêmes de la chaleur dégagée sont $32 \times 75 = 2400$; et $49 \times 75 = 3675$, nombres qui se rapprochent beaucoup de ceux obtenus par Rumfort pour les bois secs et pour ceux qui se trouvent à l'état ordinaire de dessiccation.

122. Marcus-Bull a fait un grand nombre d'expériences, pour déterminer les quantités relatives de chaleur dégagée par différentes espèces de bois, au moyen de l'appareil que nous avons décrit (104). Le mode d'opération consistait, comme nous l'avons dit, à établir entre la température de l'air de la chambre intérieure et celle de l'air de la chambre extérieure une différence constante que l'on maintenait en brûlant un combustible donné dans la chambre intérieure. L'activité de la combustion, que l'on pouvait régler à volonté, était d'autant plus grande, que le combustible développait moins de chaleur. En employant des quantités égales des divers combustibles, il est évident que leurs pouvoirs calorifiques étaient proportionnels aux temps pendant lesquels la différence constante de température était maintenue. Cette méthode, qui ne donne que les valeurs relatives des puissances calorifiques des combustibles, renferme trop de causes d'erreur pour qu'on puisse compter sur les résultats qui ont été obtenus.

Il résulte des expériences de M. Marcus-Bull, que les bois également secs ne donnent pas rigoureusement la même quantité de chaleur, car elle a varié de 6 à 6,4. Mais ces variations doivent être attribuées aux erreurs inévitables dans des expériences si compliquées.

123. Nous rapporterons encore deux expériences faites sur une grande échelle, l'une aux bains Vigier du pont Marie, l'autre à Vesserling, qui confirment les résultats précédents. Ces expériences n'ont pas eu pour objet la détermination de la puissance calorifique du bois, mais elles y conduisent.

124. Dans l'établissement de bains du pont Marie, l'appareil de chauffage est disposé de telle manière, que la fumée s'échappe à une température peu différente de celle de l'air. Dans un essai fait avec beaucoup de soin, on a brûlé, à très-peu près, $200^k$ de bois pelard en 2 heures : l'effet produit a été équivalent à l'échauffement de $7180^k$ d'eau de $85^o$. Ainsi, on a recueilli $7180 \times 85 = 610306$ unités de chaleur, ce qui donne,

pour chaque kilogramme, environ 3000, et $3000 \times \frac{5}{4} = 3750$ pour le bois parfaitement sec, car celui qui a été employé ne renfermait pas au delà de 20 pour cent d'eau.

125. A Vesserling, dans une chaudière à vapeur chauffée au bois, on a obtenu, pour la moyenne de plusieurs jours d'expérience, $3^k,24$ de vapeur par kilogramme de bois; la fumée, à son entrée dans la cheminée, était à 250°, et elle conservait encore 10 pour cent d'oxygène; par conséquent, la moitié seulement de l'oxygène de l'air avait été employée à la combustion. D'après cela, la puissance calorifique du bois se compose : 1° de la quantité de chaleur renfermée dans la vapeur produite, qui est égale à $3,24 \times 650 = 2106$; 2° de la quantité de chaleur entraînée par la fumée; or, comme le poids de l'air nécessaire pour brûler $1^k$ de bois est de $4^k,47$, et de 8,94, en supposant que la moitié de l'air ait échappé à la combustion; et comme la capacité calorifique de l'air est le quart de celle de l'eau, la quantité de chaleur entraînée par la fumée a été de $8,94 \times 250 \times \frac{1}{4} = 557$; 3° de la quantité de chaleur absorbée par la vaporisation de l'eau renfermée dans le bois, qui est égale à $\frac{650}{4} = 162$. Ainsi, la puissance calorifique du bois, déduite de cette expérience, serait de $2106 + 557 + 162 = 2825$; celle du bois complétement desséché serait de $2825 \times \frac{4}{3} = 3766$.

126. Il résulte de ce qui précède, que la quantité de chaleur dégagée par $1^k$ de bois parfaitement sec est :

| | |
|---|---|
| D'après Rumfort, de..... | 3654 |
| D'après Hassenfratz, de..... | 3675 |
| D'après l'expérience faite aux bains Vigier... | 3750 |
| D'après l'expérience faite à Wesserling, de... | 3766 |
| Moyenne..... | 3711 |

127. Ces nombres diffèrent peu les uns des autres, et sont très-voisins de celui qu'on obtiendrait en supposant que la chaleur développée par la combustion du bois résultât seulement de celle du carbone qu'il contient. En effet, les bois ordinaires de chauffage parfaitement secs contiennent à peu près 0,52 de carbone; et pour les bois secs qui donnent 0,02 de cendres, la quantité de carbone serait seulement de $0,52 \times 0,98 = 0,51$. Or, d'après les expériences de M. Dulong, que nous rapporterons plus loin, la puissance calorifique de carbone est 7161; par conséquent celle

du bois serait de 7161 × 0,51 = 3652. En prenant pour la puissance calorifique du carbone le nombre 7800, trouvé par M. Despretz, la puissance calorifique du bois sec serait de 7800 × 0,51 = 3978.

128. La coïncidence entre la puissance calorifique des bois déduite des expériences directes et celle qui résulte de l'hypothèse que l'oxygène et l'hydrogène n'ont aucune influence sur l'effet produit, quand ils sont dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, a conduit à admettre ce principe général : *La quantité de chaleur développée par un combustible organique est égale à celle qui est produite par la combustion du carbone qu'il contient, augmentée de celle qui résulte de l'hydrogène en excès.*

Il résulte de cette loi un fait très-important, c'est que dans la décomposition de l'eau il y a autant de chaleur absorbée qu'il y en a de dégagée dans sa formation ; c'est d'ailleurs un fait qui résulte de ce que les charbons humides qui brûlent avec flamme produisent autant de chaleur que le charbon sec qu'ils renferment.

129. En résumant tout ce qui précède, nous admettrons,

1° Que tous les bois au même état de dessiccation produisent sensiblement la même quantité de chaleur.

2° Que pour les bois parfaitement desséchés artificiellement, la puissance calorifique est de 3600.

3° Que pour les bois dans l'état ordinaire de dessiccation, qui renferment de 20 à 25 pour cent d'eau, la puissance calorifique varie de 2800 à 2700.

Dans l'estimation de la puissance calorifique des bois, on devrait, à la rigueur, déduire la chaleur employée à vaporiser l'eau hygrométrique, chaleur qui n'est pas restituée, du moins quand la fumée s'échappe à plus de cent degrés, et c'est le cas ordinaire ; mais comme le nombre d'unités de chaleur employées à cet effet s'élève seulement de 130 à 160, et que ces chiffres sont inférieurs à celui qui représente la variation d'eau hygrométrique, il est inutile d'y avoir égard.

130. Quant à la puissance calorifique des bois rapportée à leur volume, on ne peut donner aucun nombre un peu précis, attendu que le poids d'un même volume de bois varie non-seulement avec la densité du bois, mais beaucoup plus encore avec la grosseur des bûches, leurs courbures et la manière de les placer pour former les piles.

Les résultats suivants obtenus par M. Berthier, font voir jusqu'à quel point ces variations peuvent s'étendre.

| NATURE DES BOIS. | ÉTAT DES BOIS. | POIDS DU MÈTRE CUBE EN KILOGRAMMES. |
|---|---|---|
| Chêne de futaies des environs de Moulins | coupé depuis 1 an en bûches refendues | 275$^k$ |
| *Idem* | coupé en quatre | 515 |
| Chêne de la forêt de Monadier, près Moulins | gros bois coupé depuis 3 ans, refendu | 386 |
| *Idem* | coupé en quatre | 485 |
| Chêne des environs de Cahors. | coupé depuis 1 an | 525 |
| Chêne de charbonnage | même, long de 30 pouces | 220 à 262 |
| Hêtre des environs de Moulins. | en gros rondins refendus | 400 |
| *Idem* | vermoulu en partie | 375 |
| Bouleau des environs de Moulins | en gros rondins | 440 |
| Tremble de charbonnage | | 190 à 220 |
| Sapin de Moulins | en gros bois | 300 à 340 |

On voit d'après cela que dans chaque localité et pour l'espèce de bois qu'on emploie, des expériences directes seront nécessaires pour obtenir avec une suffisante exactitude le poids du bois sous l'unité de mesure.

131. La mesure désignée sous le nom de voie est de 2 mètres cubes ou 2 stères. La longueur des bûches étant d'après l'ordonnance de 1$^m$,14, la mesure du stère a 0$^m$,88 de hauteur sur 1 mètre de longueur. A Paris, le poids de la voie des bois de chauffage varie de 700 à 750 kilo. Celui des bois de charbonnage varie de 600 à 700$^k$.

132. *Effets produits par les différentes espèces de bois.* Quoique les bois à un état de dessiccation parfaite soient tous susceptibles de donner sous le même poids des quantités de chaleur peu différentes, leur structure produit, dans leur mode de combustion, des variétés qui ne les rendent pas tous également propres à tous les genres de travaux.

Les bois compactes ne brûlent qu'à leur surface; la chaleur qui se propage dans l'intérieur en dégage les gaz combustibles qui brûlent en totalité dans les commencements, et il ne reste bientôt qu'un charbon

volumineux, compacte, qui brûle lentement et sans flamme. Les bois légers brûlent avec beaucoup plus de rapidité, parce que leur porosité permet à l'air d'y pénétrer plus facilement et qu'ils se déchirent par l'action de la chaleur; la majeure partie du charbon qu'ils renferment brûle en même temps que les gaz combustibles, et ils ne laissent que peu de charbon; aussi ces bois donnent de la flamme presque pendant toute leur combustion. La différence, entre ces deux espèces de bois, diminue à mesure qu'ils sont en bûches d'une plus petite dimension; la raison en est évidente.

On concevra facilement, d'après ce qui précède, pourquoi, dans les verreries, les fourneaux à porcelaine, et même les fours à poterie commune, où l'on a besoin d'une température très-élevée et d'une flamme longue et continue, on emploie toujours des bois tendres, tandis que pour presque tous les autres usages, où l'on a besoin d'une température beaucoup moins élevée et dans un lieu plus voisin du foyer, les bois durs sont préférés.

Quel que soit d'ailleurs le bois que l'on emploie, l'effet calorifique sera d'autant plus grand que le bois sera plus divisé, parce qu'alors une plus petite quantité d'air échappera à l'action du combustible; en effet, il faut toujours que l'air finisse par s'échapper à une température supérieure à celle de l'atmosphère, et on conçoit facilement que plus la quantité d'air employée à la combustion de la même quantité de matière sera petite, moins il y aura de perte de chaleur par l'air qui s'écoule. Mais, indépendamment des frais qu'occasionnerait la refente du bois, souvent la nature de l'opération ne permet pas d'employer du bois trop menu, parce que la combustion serait trop rapide. Il n'y a qu'un petit nombre d'usines, telles que certaines verreries et les fabriques de porcelaine, où la prompte combustion étant un avantage, puisqu'elle produit toujours une température plus élevée, il soit important d'employer le bois refendu.

133. *Pouvoir rayonnant.* Relativement à la quantité de chaleur rayonnante que le bois dégage pendant sa combustion, j'ai reconnu qu'elle était variable pour les différents bois, mais que, quand ils étaient brûlés en morceaux très-menus, elle était à peu près constante. Voici le résultat d'une expérience faite sur du bois de hêtre :

La température de l'atmosphère était de 20°; l'eau introduite dans le

vase était à 17°,5; par la combustion de 97ᵍ,5 de bois, elle s'est élevée à 22°,5; ainsi, la quantité de chaleur absorbée par l'eau avait élevé sa masse de 5°; la quantité d'eau que renfermait l'appareil était de 11ᵏ,29; le poids de l'enveloppe était de 2ᵏ,223; comme la capacité calorifique du fer-blanc est de 0,11, la quantité de chaleur absorbée par le vase est égale à celle de $2^k,223 \times 0,11 = 0^k,244$ d'eau, élevé de 5°; par conséquent, la quantité de chaleur absorbée par l'appareil = $(11^k,291 + 0^k,244)$ 5° = 57,65 unités de chaleur.

Or, d'après ce que nous avons dit (108), la quantité totale de rayonnement = 57,65 × 1,36 = 78,40 unités. Mais d'après l'art. 129, 1000 grammes de bois doivent donner, en brûlant, 2800 unités de chaleur, qui se dissipent et par le courant d'air et par le rayonnement; par conséquent 97ᵍ,5 ont dû en produire 273. Ainsi, la quantité de chaleur dispersée par le rayonnement est à la chaleur totale développée :: 78,40 : 273 :: 1 : 3,48, ou par approximation :: 1 : 3,5; la quantité de chaleur rayonnante est par conséquent à celle qui est entraînée par le courant d'air :: 1 : 3,5 — 1 :: 1 : 2,5.

Ce rapport est beaucoup plus considérable qu'on ne l'avait cru jusqu'ici; mais il est encore beaucoup plus grand lorsque le bois est brûlé en grandes masses, de manière à donner naissance à des charbons volumineux, parce que le pouvoir rayonnant des charbons est beaucoup plus considérable que celui des flammes, comme nous le verrons plus tard.

### § 3. — CHARBON DE BOIS.

134. Le charbon de bois est, comme l'indique son nom, une substance qui ne contient plus que le carbone qui se trouvait dans le bois. Les produits de la combustion de charbon de bois parfaitement carbonisé, sont uniquement formés d'acide carbonique; mais, comme le charbon de bois contient presque toujours une certaine quantité d'hydrogène, il se forme alors une quantité correspondante de vapeur d'eau. Le charbon, quel que soit le mode de fabrication par lequel il ait été obtenu, conserve la structure du bois; il est plus léger, plus sonore, et brûle sans flamme quand il est pur. Quant à ses autres propriétés, elles varient et avec le mode de fabrication et avec la nature du bois qui l'a

fourni : nous ne les exposerons qu'après avoir décrit les différentes méthodes de carbonisation.

D'après M. Berthier, tous les bois qui ne sont pas résineux produisent la même quantité de charbon quand ils sont soumis à la même méthode de carbonisation.

135. *Différentes méthodes de carbonisation du bois.* La carbonisation en meule, dont la connaissance remonte à une époque très-reculée, est encore généralement suivie dans nos forêts.

On commence par choisir, à portée du bois que l'on exploite, un terrain ferme, uni, horizontal, pour y établir le fourneau. Si l'on ne trouvait dans le voisinage de l'exploitation qu'un terrain rocailleux, on le nivellerait par des transports de terre. Après avoir battu le sol à la dame et avoir tracé la circonférence du fourneau, on place verticalement une des plus grosses bûches, et on range horizontalement et dans la direction des rayons du cercle les bûches les plus grosses; sur cette première couche de bois, qu'on nomme le plancher, on place d'autres lits disposés de la même manière, mais d'un diamètre de plus en plus petit, de manière à former un cône tronqué. Plus souvent les bûches sont placées verticalement sur le premier plancher. Quand la pile a atteint la hauteur de la bûche centrale, on place une seconde bûche sur celle qui formait l'axe, afin d'en doubler la hauteur, et on continue de monter la pile jusqu'au sommet de la seconde bûche. Cette opération étant terminée, on revêt toute la surface extérieure de la meule d'une couche de fraizin : on désigne ainsi un mélange de terre et de poussier de charbon qui reste sur le sol du fourneau après l'opération. Faute de fraizin, on se sert de terre très-divisée, de gazon, pour former le premier enduit du fourneau; il doit avoir de 4 à 6 pouces d'épaisseur. On a soin de laisser à découvert quelques trous correspondants aux rondins placés à la base, afin de donner accès à l'air extérieur dans la meule.

Le fourneau étant ainsi disposé, on peut le mettre en feu; pour cela, on enlève la bûche placée dans l'axe lors de l'élévation du dernier étage, et on jette dans le vide qu'elle laisse du bois sec très-menu et des charbons incandescents. La combustion se propage rapidement, et bientôt il sort de la fumée, non-seulement par la cheminée, mais encore par un grand nombre de points de la surface du fourneau. Aussitôt que la

flamme commence à sortir par la cheminée, on ferme celle-ci en partie par une plaque de gazon. Le charbonnier doit alors observer le feu avec attention, afin de régler l'entrée de l'air et l'issue de la fumée le plus régulièrement possible; il doit couvrir de terre les parties de la surface d'où la fumée se dégage en trop grande abondance, et il doit, de temps en temps, ajouter de la terre au bas du fourneau pour rétrécir continuellement les ouvertures qui donnent accès à l'air extérieur. Les vents peuvent avoir une influence très-fâcheuse sur les fourneaux à charbon; aussi est-on souvent obligé de s'en préserver par des abris ordinairement formés d'un clayonnage en osier.

Après un certain temps, qui dépend de la grandeur de la meule, toute la masse est incandescente, et l'ouvrier attend l'apparition du *grand feu;* c'est le moment où l'enveloppe devient rouge ; à cet instant, le charbon est fait. Alors on jette de la terre sur le fourneau pour le recouvrir en totalité et arrêter la combustion; quelques heures après, on renouvelle cette enveloppe, et on attend que le charbon soit éteint pour le retirer.

On voit, d'après cela, que la réussite de l'opération dépend uniquement des soins et de la vigilance des ouvriers, et que les moindres négligences, ou des vents violents dont on ne pourrait pas s'abriter, occasionneraient non-seulement de grandes diminutions dans le produit en charbon, mais encore pourraient ne laisser que des cendres pour résultat de l'opération.

136. Par ce procédé, on obtient de 17 à 18 de charbon pour cent parties de bois en poids; dans les grandes meules, le produit est plus considérable. On obtient en volume de 25 à 30 dans les petites meules, et de 30 à 34 dans les grandes.

137. D'après les renseignements recueillis par M. Sauvage, ingénieur des mines, dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les essences de bois employées pour la carbonisation sont $\frac{1}{4}$ de hêtre et de chêne, $\frac{1}{4}$ de tremble et de saule, $\frac{1}{2}$ de charme. Les bûches ont de 28 à 30 pouces de longueur; elles sont placées presque verticalement dans le fourneau qui en renferme trois couches; les fourneaux contiennent ordinairement de 60 à 90 stères; la carbonisation dure de sept à douze jours. Les rendements sont ainsi qu'il suit :

*Ardennes.*

| | Bois mêlés. |
|---|---|
| Poids du stère de bois | 300$^{k}$ |
| Un stère rend en volume | $0^{m.c.},30$ à $0^{m.c.},33$ |
| Un stère rend en poids | 60 à 66$^{k}$ |
| 100$^{k}$ de bois rendent | 20 à 22$^{k}$ |
| Le poids du mètre cube de charbon est | 200$^{k}$ |

*Meuse.*

| | Bois durs. |
|---|---|
| Poids du stère de bois | 375$^{k}$ |
| Un stère rend en volume | $0^{m.c.},33$ à $0^{m.c.},40$ |
| Un stère rend en poids | 80$^{k}$ |
| 100$^{k}$ de bois rendent | 21$^{k}$ |
| Le poids du mètre cube de charbon est | 240$^{k}$ |

138. Marcus-Bull, en remplissant les intervalles des bûches avec du poussier de charbon, a obtenu une augmentation notable dans le rendement. L'accroissement de produit obtenu par ce moyen est facile à comprendre : le poussier de charbon, en brûlant, préserve le bois de la combustion.

139. Le mode d'opération que nous venons de décrire a l'inconvénient d'être d'une direction difficile à cause des vents, et celui de faire perdre tous les produits de la distillation des bois. On a proposé différents procédés pour éviter ces inconvénients; nous les décrirons successivement.

140. Le premier procédé, dû à M. Foucault, consiste à entourer le fourneau d'une enveloppe fermée de toute part, facilement transportable, qui reçoit les fumées qui se dégagent, et d'où celles-ci peuvent être dirigées dans des appareils de condensation. L'intervalle du fourneau et de l'enveloppe est assez grand pour permettre aux ouvriers de surveiller le feu.

Un abri de 30 pieds de diamètre à sa base, de 10 pieds à son sommet, et de 8 à 9 pieds de hauteur, se compose de 10 châssis de 12 pieds de long, ayant 3 pieds à la base et 1 au sommet; ces châssis sont formés de pièces de bois de 2 pouces d'équarrissage; leurs montants sont garnis de trois poignées qui se correspondent, et au moyen desquelles on maintient les châssis en passant un morceau de bois dans deux poignées contiguës. Ces châssis, avant d'être placés, sont recouverts d'échalas et enduits de terre détrempée; l'ouverture supérieure du cône tronqué

est fermée par un plateau en bois muni de deux trappes destinées à laisser échapper la première fumée; une ouverture triangulaire, pratiquée sur le même couvercle, est destinée à recevoir un conduit de même forme, composé de trois planches, qui sert à conduire et à condenser les fumées; il communique avec une série de tonneaux où l'acide pyroligneux condensé se réunit. Une porte est destinée à permettre au charbonnier de visiter le fourneau. Lorsqu'on veut changer de place, on bat les châssis pour faire tomber leur enduit terreux, et on enlève les clavettes qui les tenaient réunis. Cet appareil paraît donner d'assez bons résultats, et sous le rapport de la qualité et sous celui du rendement.

141. Le second procédé dont nous allons parler, a d'abord été proposé par M. Baillet, inspecteur des mines; il a été reproduit plus tard par M. Lamothe, et par M. de Foncand, et mis seulement ensuite en pratique par M. de la Chabeaussière, qui y a ajouté différents perfectionnements.

Ce procédé consiste à former le fourneau d'un cylindre en terre battue, creusé dans le sol ou élevé sur le terrain; dans le premier cas, on pratique dans le sol des évents qui viennent s'ouvrir au bas du cylindre; dans le second, les évents sont percés au bas du cylindre. Dans les deux cas, le cylindre est fermé par un couvercle en tôle, mobile au moyen d'une grue. Ce plateau est percé au centre d'un orifice destiné à introduire dans le fourneau des matières incandescentes pour l'allumer, et à sa circonférence, de plusieurs orifices plus petits, destinés à régler le travail du fourneau. Tous ces orifices sont ordinairement bouchés. La fumée se dégage par un orifice latéral, pratiqué vers le bord supérieur du fourneau, qui communique par des tuyaux en terre avec une série de tonneaux, dans lesquels se condensent l'eau, l'acide et le goudron qui proviennent de la distillation du bois. Voyez, pour plus de détails, le tome 20 du Bulletin de la Société d'encouragement, et le Dictionnaire technologique, tome 5. Par ce procédé, on obtient 20 de charbon en poids, pour 100 de bois.

142. Le dernier procédé est dû à M. Schwartz. L'appareil se compose d'une voûte en terre battue, fermée aux deux extrémités par des murs de même matière; c'est dans cet espace que l'on place le bois à carboniser. Le sol du fourneau est à double pente, pour permettre l'écou-

lement du goudron, qui est reçu dans des vases par des tuyaux plongeurs, afin d'éviter la communication de l'air avec l'intérieur du fourneau. En avant des deux murs verticaux, se trouvent deux foyers, qu'on alimente avec des fagots ou des bois impropres à la carbonisation, et dont la flamme pénètre dans le fourneau. Sur les deux autres faces et à fleur du sol, se trouvent des tuyaux pour le dégagement de la fumée; ces tuyaux sont interrompus par une série de tonneaux, dans lesquels se réunissent les produits de la condensation de la fumée, et aboutissent à une cheminée commune, dans laquelle le tirage peut être augmenté par un foyer. Cet appareil donne à peu près 18 de charbon pour 100 parties de bois.

143. Ces différents procédés ne sont pas plus avantageux, sous le rapport du rendement, que celui qui est généralement suivi dans les forêts, aussi ils ont été abandonnés, et on continue à employer exclusivement l'ancienne méthode.

144. Dans les fabriques d'acide pyroligneux, le bois est distillé dans des chaudières en tôle, qu'on peut enlever des fourneaux et replacer au moyen d'une grue. Ces chaudières communiquent avec l'appareil de condensation au moyen d'un tuyau, et les gaz, après leur refroidissement et la condensation des vapeurs, sont dirigés dans le foyer où ils sont brûlés. La consommation de bois dans le foyer est de 12,5, pour distiller 100 parties de bois. Le charbon obtenu est de bonne qualité; son poids s'élève de 28 à 30 pour 100 parties de bois.

Dans ce mode d'opération, comme nous venons de le dire, on brûle sur la grille les gaz combustibles qui se dégagent, mais après qu'ils ont été séparés de l'acide pyroligneux et du goudron qu'ils renfermaient. Il n'est pas douteux que si ces gaz et le goudron arrivaient chauds sur la grille, ils suffiraient seuls à la distillation.

145. On voit, d'après tous ces résultats, que les produits de la distillation du bois varient beaucoup avec le mode d'opération; mais la différence provient surtout de la durée de l'opération; plus elle s'effectue lentement, et moins il y a de charbon entraîné par les gaz. D'après les expériences de Karsten, le bois séché à l'air et soumis longtemps à une température de 150°, finit par ne plus éprouver d'altération; il est alors transformé en une matière charbonneuse, dont le poids s'élève à 31 ou 34 pour cent du poids du bois. Si le bois avait été

d'abord complétement desséché, le poids de la matière charbonneuse serait de 40 à 44 pour cent du bois. Par une distillation rapide en vase clos, les différentes espèces de bois réduits en copeaux très-minces, donnent des quantités de charbon qui varient entre 12 et 16 pour cent; et par une distillation lente, dans laquelle la matière est élevée progressivement jusqu'au rouge, les produits varient de 24 à 27 pour cent.

146. Il résulte de ce que nous venons de dire, que les différents procédés employés pour la fabrication du charbon de bois se divisent en deux classes : dans la première, la chaleur nécessaire à la carbonisation provient de la combustion d'une partie du bois; dans la seconde, la chaleur est fournie par un combustible étranger. Dans tous les cas on est loin d'obtenir tout le charbon qui existe dans le bois. En effet, considérons du bois parfaitement sec : nous pourrons, du moins pour les bois généralement employés à la carbonisation, négliger la petite quantité de matière étrangère qui s'y trouve renfermée; dans cet état, le bois ne contient environ que 50 pour cent de carbone, bien que sa puissance calorifique corresponde à 53 de carbone à cause du petit excès d'hydrogène qu'il contient. Alors le bois parfaitement sec devrait produire 50 pour cent de charbon, et le bois à 25 pour cent d'eau, à peu près 37,5. Ainsi, le bois ordinaire de charbonnage devrait produire 37,5 de charbon, si on pouvait extraire l'oxygène et l'hydrogène sans enlever de carbone, et si la chaleur nécessaire à la séparation de l'eau était fournie par un combustible étranger; ce serait par conséquent le rendement qu'on pourrait obtenir dans la distillation en vase clos. Mais, comme nous l'avons vu, on n'obtient que 28 pour cent; ainsi il y a 9,5 parties de charbon entraînées par les gaz. Lorsque la distillation a lieu par la chaleur qui résulte de la combustion d'une partie du bois, le rendement est beaucoup plus petit; on peut avoir une valeur approchée du maximum qu'on pourrait atteindre, en supposant que la quantité de chaleur nécessaire à la décomposition du bois se compose de la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau, et de celle qu'exige le chauffage à 500° du charbon et des gaz qui se dégagent.

| | | |
|---|---|---|
| Chaleur pour la vaporisation de l'eau..... | $62,5 \times 650$ | $= 40625$ |
| Chaleur pour l'échauffement de la vapeur... | $62,5 \times 400 \times 0,84$ | $= 21000$ |
| Chaleur pour l'échauffement du charbon... | $37,5 \times 500 \times 0,24$ | $= 4500$ |
| | | 66125 |

Cette quantité de chaleur correspond à $\frac{66125}{7161} = 9{,}23$ de charbon, et serait même réduite à près de moitié si on supposait que l'excès d'hydrogène contenu dans le bois fût brûlé; il l'est probablement en partie; mais en n'ayant pas égard à cette circonstance, on voit que, dans la carbonisation en meule, on pourrait obtenir 28,3 pour cent de rendement, et ce rendement serait possible, car il diffère peu de celui qu'on obtient dans les vases clos. Ainsi, dans la carbonisation du bois en meule, le rendement, qui n'est au plus que de 20, pourrait être dépassé de beaucoup. Mais, pour cela, il faudrait nécessairement changer la disposition des appareils. Les conditions auxquelles il paraîtrait le plus important de satisfaire, seraient 1° une distribution uniforme de la chaleur dans la masse à convertir en charbon; 2° l'emploi pour le chauffage du bois menu qui ne peut pas être converti en charbon; 3° un mode de chauffage qui permît de le régler à volonté. Cette dernière circonstance est peut-être la plus importante de toutes, car, dans la carbonisation du bois en vases clos on remarque une accélération subite dans l'opération, quand la calcination a atteint un certain point, accélération qui diminuerait beaucoup le rendement, si, à l'instant où elle se manifeste, on n'éteignait pas le foyer. Le même phénomène se reproduit dans la carbonisation en meule; à une certaine époque de l'opération, le dégagement des gaz devient tout à coup très-considérable, et si on ne le maîtrisait pas, en bouchant une grande partie des issues, la perte deviendrait très-grande. Le mode de carbonisation employé par M. Échemont, pour la fabrication des charbons roux, dont nous parlerons plus loin, convenablement modifié, conduirait peut-être à de bons résultats. La vapeur chauffée après son émission, employée déjà par MM. Thomas et Laurens, pour la revivification du noir animal, et qu'ils ont déjà essayée pour la fabrication du charbon de bois, serait peut-être le moyen le plus avantageux. Mais les appareils devraient être simples, peu dispendieux et facilement transportables, et ces conditions seront probablement difficiles à remplir.

147. *Charbon roux.* MM. Honzeau et Fauveau ont imaginé d'employer dans les hauts fourneaux marchant au charbon de bois, du bois seulement en partie carbonisé, et ils ont obtenu des résultats très-satisfaisants. Avec le charbon ordinaire, pour produire 1000 kilogrammes de fonte, on employait 21 stères de bois, tandis qu'avec le nouveau procédé,

11 stères suffisent. Le nouveau charbon est brun foncé, cassant, facile à pulvériser. Une corde de bois pesant 375 à 380 kilogrammes produit 220 kilogrammes de charbon brun, à peu près 0,57, dont l'effet, d'après M. Berthier, correspond à 0,535 de son poids de charbon. Ainsi le rendement apparent en carbone d'une corde de bois pesant 380 kilogrammes, serait de $220 \times 0{,}535 = 117^{k},7$ de charbon, ou de 0,31; rendement qu'on n'obtient jamais par aucun procédé, quand la carbonisation est complète.

MM. Honzeau et Fauveau ont employé pour produire cette carbonisation, la chaleur perdue d'un haut fourneau. Le bois était placé dans des caisses en fonte ayant 1 mètre cube de capacité, dont les fonds et les faces latérales étaient parcourus par la flamme du gueulard (*Annales des Mines*, tome 10).

148. Depuis, M. Sauvage, ingénieur des mines, a constaté dans l'usine d'Haraucourt, dirigée par MM. Fort et Guillaume, les mêmes effets économiques; et il a fait sur la préparation des charbons roux des expériences nombreuses dont nous rapporterons les principaux résultats (*Annales des Mines*, tome 11).

Les expériences ont été faites sur le bois, le charbon noir, et du bois soumis à des distillations qui ont duré 3 heures, 4 heures trois quarts, 5 heures, 5 heures et demie, 6 heures et demie. Les résidus de ces distillations partielles seront désignés par les lettres A, B, C, D, E.

Les poids des résidus obtenus par une simple dessiccation, par les 5 distillations partielles et par une calcination complète, ont été :

0,72; 0,65; 0,53; 0,47; 0,41; 0,39; 0,17.

Ces résidus représentent les quantités suivantes de carbone :

0,375; 0,314; 0,28; 0,27; 0,25; 0,25; 0,14.

Par une calcination brusque et complète ces résidus donnent les quantités suivantes de charbon :

0,126; 0,124; 0,137; 0,173; 0,174; 0,184; 0,13.

Ainsi on voit que la richesse des résidus décroît à mesure que la calcination est plus avancée, comme il était facile de le prévoir, mais que la variation est très-petite pour les états B, C, D et E, et que les produits en charbon complet sont d'autant plus forts que le bois a été plus longtemps soumis à l'action de la chaleur.

149. Mais ce mode de travail n'est réellement avantageux qu'autant que les bois ne sont pas très-éloignés des usines; car s'il en était autrement, la différence des frais de transport des bois et des charbons pourrait compenser, et au delà, l'avantage de l'emploi des charbons roux sur celui des charbons ordinaires.

150. On s'est alors occupé de la fabrication des charbons roux dans les forêts. On a d'abord essayé si, par la méthode ordinaire, en arrêtant la calcination à une époque convenable, on ne parviendrait pas au résultat cherché; mais on n'a rien obtenu de satisfaisant : une partie du bois était transformée en charbon noir, et une autre était à peine altérée. Mais M. Échemont paraît avoir complétement réussi, par une disposition particulière du fourneau et du mode de chauffage. Le fourneau a la forme d'un prisme allongé; le bois y est placé horizontalement, et il est recouvert à la méthode ordinaire. Au-dessous du fourneau et dans l'axe se trouve un canal creusé dans le sol, de 0,2 de côté, fermé en dessus par des plaques de fonte disposées de manière à laisser de petits intervalles entre elles; autour de ce canal le bois est disposé de manière à former une voûte concentrique, demi-cylindrique, de 0,5 à 0,6 de rayon. Le canal creusé dans le sol communique avec un foyer à grille construit à l'un des bouts du fourneau, dans lequel l'air est injecté par un ventilateur à force centrifuge, mis en mouvement par un enfant. Le foyer est entretenu avec du bois et des branchages. La quantité de bois qu'on brûle dans le foyer est égale à $\frac{1}{10}$ de celle du bois torréfié. On conçoit facilement que par cette méthode on puisse arriver à une calcination uniforme dans toute la masse, car on est maître de faire passer le courant d'air chaud par une partie quelconque du fourneau, puisque cette direction est déterminée par la position des orifices de l'enveloppe (*Annales des Mines*, tome 16).

151. *Propriétés du charbon de bois.* Le charbon de bois est solide, cassant, friable; il conserve la structure du bois qui l'a produit; quoique facile à pulvériser, il donne une poussière qui est très-dure. En masse il est plus léger que l'eau, mais quand il est en poudre sa densité est à peu près égale à 2.

152. D'après M. Berthier, le charbon, tel qu'on le trouve dans le commerce et tel qu'on l'emploie habituellement dans les arts, perd de 0,14 à 0,15 de son poids lorsqu'on le calcine à la chaleur blanche, parce qu'il

renferme des gaz combustibles, et en outre de l'eau hygrométrique qu'il prend rapidement dans l'atmosphère.

Voici les poids d'un mètre cube des principales variétés du charbon :

| | kilogrammes. |
|---|---|
| Charbon de chêne et de hêtre..... | 240 à 250 |
| *Idem* de bouleau..... | 220 à 230 |
| *Idem* de pin..... | 200 à 210 |

153. Le charbon de bois est infusible. Il jouit de la propriété d'absorber un grand nombre de gaz.

154. Les charbons qui n'ont été soumis qu'à la température seulement suffisante pour leur production, sont à la fois mauvais conducteurs de la chaleur et de l'électricité et très-combustibles; tandis que ceux qui ont été rougis sont bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, d'une combustion difficile, et d'autant plus qu'ils ont été plus fortement chauffés. Lorsque les premiers sont séparés d'un foyer et exposés à l'air, ils continuent de brûler, tandis que les autres s'éteignent. Ces dernières propriétés sont les conséquences nécessaires de la différence de conductibilité.

155. Lorsque des charbons ont été soumis à la même température, ils sont d'autant plus conducteurs de la chaleur et de l'électricité, et d'autant moins combustibles, qu'ils proviennent de bois plus denses.

156. Les charbons ordinaires absorbent très-rapidement l'humidité de l'air; ils en prennent, terme moyen, de 0,07 à 0,08, mais d'autant moins qu'ils renferment plus de matières volatiles. Les charbons roux d'Angoulême n'absorbent que 0,04, et les charbons calcinés à la chaleur blanche 0,12 à 0,13.

157. Les charbons de bois après leur immersion dans l'eau retiennent des quantités très-considérables de ce liquide, mais d'autant moins qu'ils ont été soumis à une température plus élevée. D'après M. Chevreuse,

| | |
|---|---|
| 100 parties de charbon de peuplier non rougi ont absorbé.. | 753 |
| 100 parties du même charbon rougi..... | 482 |
| 100 parties de charbon de gaïac non rougi..... | 77 |
| 100 parties du même charbon rougi..... | 46 |

Le charbon se vendant à la mesure, les marchands n'ont aucun intérêt à le mouiller; cependant, comme on prend rarement les précautions né-

cessaires pour le soustraire à la pluie, il est rare de trouver des charbons qui ne contiennent pas de 10 à 12 pour cent d'eau. Il en résulte un inconvénient assez grave; pendant la combustion une partie de la chaleur est employée inutilement à vaporiser cette eau.

158. Les charbons de bois conservés longtemps deviennent friables, et dans le transport produisent beaucoup de poussier; les charbons légers ont cet inconvénient plus que ceux qui proviennent des bois compactes. On attribue cet effet à la cristallisation des sels que renferme le charbon, cristallisation qui produit dans le charbon un phénomène analogue à celui de la gelée dans certaines pierres de construction.

159. Pour le service des hauts fourneaux et des forges, on garde les charbons en halle sept à huit mois. Au delà de ce terme ils commencent à se détériorer sensiblement. Quand on est obligé de les conserver en tas exposés à l'air, on les abrite par des couvertures légères; mais ils perdent alors beaucoup de leur qualité par un séjour de plusieurs mois. Cependant on a reconnu que les charbons récents sont moins avantageux qu'après un séjour d'un à deux mois dans les halles.

160. Les charbons de bois donnent des quantités de cendres qu'il est facile de calculer quand on connaît celles qui résultent de la combustion du bois, et les quantités de charbon que peuvent produire les différentes espèces de bois; car les cendres du bois se trouvent toutes dans celles du charbon qu'il produit. Or, d'après le tableau page 57, la quantité moyenne de cendres des différents bois est à peu près de 0,015, et en admettant le chiffre 20, pour la quantité de charbon produit, on trouve que la quantité moyenne de cendres que peuvent donner les différents charbons est de $0{,}015 \times \frac{100}{20} = 0{,}075$.

161. *Puissance calorifique.* Tous les charbons en brûlant dégagent sensiblement la même quantité de chaleur; c'est un fait qui était connu depuis longtemps, et que Marcus Bull a constaté par des expériences faites sur des charbons de noyer, d'érable, de chêne et de pin.

162. Mais tous les charbons ne brûlent pas de la même manière: ceux qui sont compactes brûlent plus difficilement et plus lentement que les charbons légers, et ne peuvent pas produire dans un foyer une température aussi élevée.

163. La quantité absolue de chaleur développée par la combustion du charbon a été déterminée par différents physiciens; voici les résultats

qui ont été obtenus. Les nombres représentent les unités de chaleur produites par la combustion de 1 kilog. de charbon.

| | |
|---|---|
| Laplace, Lavoisier | 7226 |
| Hassenfratz | 7200 |
| Clément et Desormes | 7050 |

164. La puissance calorifique des charbons doit varier dans des limites assez étendues, non-seulement à cause de l'inégalité des quantités de cendres qu'ils produisent, mais surtout par la variation des quantités de gaz et d'humidité qu'ils contiennent.

D'après M. Sauvage, ingénieur des mines, le charbon fabriqué dans les forêts serait composé de

| | |
|---|---|
| Carbone | 0,79 |
| Matières volatiles | 0,16 |
| Cendres | 0,79 |

et représenterait 0,85 de carbone. La puissance calorifique serait alors $7161 \times 0{,}85 = 6086$.

Mais comme l'équivalent en carbone a été obtenu par des expériences faites au moyen de la litharge, et que ce procédé suppose que la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'hydrogène est seulement trois fois plus grande que celle produite par le même poids de carbone, tandis que les expériences de M. Dulong donnent un rapport beaucoup plus grand, nous regardons le nombre ainsi obtenu comme étant beaucoup trop petit.

La puissance calorifique du charbon fortement calciné et ne renfermant ni gaz ni eau hygrométrique serait de $7161 \times 0,93 = 6659$.

Si on admettait, d'après M. Despretz, le nombre 7800 pour la puissance calorifique du carbone, on trouverait 7200 pour celle du charbon fortement calciné, et un nombre beaucoup plus grand pour les charbons ordinaires.

165. Désormais nous admettrons que la puissance calorifique des charbons de bois varie entre 6600 et 7000.

166. Les valeurs relatives des différents charbons sous le même volume et dans l'état où ils se trouvent ordinairement dans le commerce, sont, d'après Bull, dans les rapports des nombres suivants :

| | |
|---|---|
| Charbon de noyer | 166 |
| Charbon d'érable | 114 |
| Charbon de chêne | 106 |
| Charbon de pin | 75 |

Ces nombres sont proportionnels aux poids spécifiques de ces différents charbons.

167. *Pouvoir rayonnant.* Reste maintenant à déterminer le pouvoir rayonnant du charbon de bois.

Voici les éléments de l'expérience que j'ai faite à ce sujet, au moyen de l'appareil décrit (108).

La température de l'atmosphère était de 21°. L'eau introduite dans le vase était à 14°. Par la combustion de 56 grammes de charbon, elle s'est élevée à 28°. Ainsi la quantité de chaleur absorbée par l'eau avait élevé sa température de 14°. La quantité d'eau que renfermait l'appareil était, comme dans l'expérience sur le bois (133), de 11$^{k}$,29. Le poids de l'enveloppe étant toujours de 2$^{k}$223, la quantité de chaleur absorbée par le vase était équivalente (133) à celle qui serait renfermée dans 0$^{k}$,244 d'eau élevés de 14°.

Par conséquent la quantité totale de chaleur absorbée par l'appareil était de (11,29 + 0,244) 14° = 161,47 unités de chaleur, et la quantité de chaleur rayonnée (108) = 161,47 × 1,36 = 219,60. Mais nous avons vu (165) que la quantité totale de chaleur dégagée par 1000 grammes de charbon était de 7000 unités, d'où il suit que 56 grammes ont dû en produire 392. Ainsi la quantité de chaleur dispersée par le rayonnement est à la quantité totale de chaleur développée :: 219,6 : 392 :: 1 : 1,78; et la quantité de chaleur rayonnante est à celle qui est entraînée par le courant d'air chaud :: 1 : 0,78.

D'après cela, la quantité de chaleur que le charbon rayonne est à celle qui est emportée par le courant d'air chaud :: 5 : 4. Ce résultat est bien supérieur à tout ce que l'on a dit jusqu'ici sur la chaleur rayonnante; mais j'ai répété plusieurs fois l'expérience, et j'ai toujours obtenu des résultats peu différents.

Les expériences ont été faites sur du charbon incandescent qui a été pesé dans cet état. Une fois la totalité du charbon n'était pas entièrement allumée, et j'ai obtenu un résultat plus faible, à peu près de $\frac{1}{3}$, mais il y avait au moins $\frac{1}{3}$ de la surface du charbon non incandescente.

Cette manière d'opérer aurait dû occasionner une petite correction, relative à la quantité de chaleur qui se trouvait déjà dans le charbon au commencement de l'expérience; mais il est facile de la calculer. En effet, la capacité calorifique du charbon est de 0,26; en admettant que sa température ait été de 500°, les 56 grammes de charbon, dont il faut seulement tenir compte, auraient renfermé une quantité de chaleur capable d'élever 1 gramme d'eau de $500 \times 56 \times 0{,}26 = 7280°$, ou $1^k$ d'eau de 7°,28, ou enfin $11^k{,}29$, qui est la quantité d'eau de l'appareil, de 0°,6. Ainsi, l'erreur pouvait au plus s'élever à 0,04. En prenant 13° pour la différence de température au lieu de 14°, on trouve que la quantité de chaleur rayonnante est à la quantité totale comme 1 : 1,92.

Je ne crois pas qu'on s'éloigne beaucoup de la vérité en admettant que le pouvoir rayonnant du charbon disperse $\frac{1}{2}$ de la chaleur totale : c'est le résultat approximatif que nous admettrons.

### § 4. — TANNÉE.

168. Le tan épuisé qui n'est plus formé que de la partie ligneuse de l'écorce de chêne, sert de combustible dans un grand nombre de localités. Pour l'employer, on le comprime, encore humide, dans des moules de fer ordinairement circulaires; les mottes qui résultent de cette opération sont séchées à l'air libre, et sont vendues pour le chauffage domestique des familles les plus pauvres. Les mottes renferment encore beaucoup d'eau, elles brûlent lentement et donnent beaucoup de cendres. C'est un combustible précieux dans les grandes cités, où en général les autres combustibles sont beaucoup plus chers. La production du tan étant peu considérable, son emploi dans les usines sera toujours très-limité. Il y a cependant des circonstances dans lesquelles il peut être employé avec avantage : on en jugera facilement d'après les résultats suivants.

169. $1250^k$ d'écorce de chêne produisent $1000^k$ de tannée sèche, et ces $1000^k$ se vendent à Paris 10 francs. $1000^k$ de tannée équivalent pour la puissance calorifique à $800^k$ de bois ou de 270 à $300^k$ de houille; les $800^k$ de bois coûtent à Paris à peu près 39 francs, et les 300 de houille à peu près 15 francs en comptant à 4 francs l'hectolitre ras de $80^k$. Ainsi, pour des quantités égales de chaleur développées, les prix de la tannée, du bois et de la houille, sont proportionnels aux nombres 10, 39, et 15.

170. Dans un des faubourgs de Paris, une machine à vapeur de 12 chevaux à basse pression est alimentée par de la tannée sèche : elle en consomme de 1600 à 1700$^{k}$ en 12 heures. Ce qui fait 12$^{k}$ par cheval et par heure.

171. Les résidus qui proviennent des bois de teinture peuvent être employés au même usage que la tannée.

D'après des expériences faites en 1830, par M. Pimont, les résidus de bois de teinture abandonnés pendant quelques mois dans des fosses, éprouvent une fermentation à la suite de laquelle ils peuvent facilement être moulés comme le tan; il estime à 3 francs le prix de revient de 1000 briques dont le poids s'élève à 360$^{k}$, et il regarde ce combustible comme présentant une économie des deux tiers sur la houille.

172. Désormais nous admettrons que la puissance calorifique de la tannée parfaitement sèche est 3300, et que celle de la tannée dans l'état ordinaire de dessiccation est seulement 2300.

## § 5. — TOURBE.

173. La tourbe est un combustible léger, spongieux, d'un brun noirâtre. Elle est formée de plantes herbacées, entrelacées, souvent reconnaissables, et dont la décomposition est plus ou moins avancée. Les tourbes renferment toujours une quantité plus ou moins considérable de terre et de sable.

174. Les produits de la combustion de la tourbe sont assez compliqués, parce qu'il est difficile de la rendre complète. Ils sont composés des mêmes éléments que ceux qui se dégagent de la combustion incomplète du bois; on y trouve en outre de l'ammoniaque, et souvent de l'acide sulfureux.

175. On distingue plusieurs variétés de tourbes; mais une seule est employée communément comme combustible, c'est celle des marais. Cette tourbe a des caractères qui varient suivant la profondeur à laquelle elle a été prise. A la surface du sol la tourbe est lâche et composée de végétaux à peine décomposés; à mesure que l'on s'enfonce davantage dans la couche, elle devient plus compacte, plus noire, et les débris organiques qui la composent sont plus altérés; enfin, dans les dernières assises, la tourbe ne laisse plus apercevoir de traces de végétaux.

Cette espèce de tourbe se trouve, comme l'indique son nom, dans les

terrains marécageux et humides, ou qui ont été le fond d'étangs ou de lacs d'eau douce. Elle n'est jamais enfouie profondément, elle est ordinairement recouverte d'une couche de terre ou de sable de quelques décimètres d'épaisseur. Les couches de tourbe atteignent souvent une grande épaisseur : on en connaît qui ont plus de dix mètres. Les bancs de tourbe ont souvent une très-grande étendue. Ils sont beaucoup plus répandus dans le nord que dans le midi.

La tourbe provient sans aucun doute des débris de plantes aquatiques déposés successivement au fond des marais; mais comme tous les marais ne renferment pas de tourbe, il faut nécessairement admettre que leur formation exige ou des espèces particulières de végétaux ou des circonstances qui ne se rencontrent pas partout.

Les tourbières les plus considérables de la France, sont : 1° celles de la vallée de la Somme, entre Amiens et Abbeville; 2° celles des environs de Beauvais; 3° celles de la rivière d'Essonne, entre Corbeil et Villeroi; 4° celles des environs de Dieuze. La Hollande, la Westphalie et l'Écosse sont très-riches en tourbes.

176. La tourbe s'extrait en mottes carrées de la grosseur d'une brique; quelquefois on la délaye et on la moule ensuite. La tourbe est ordinairement séchée sur le lieu même de l'exploitation.

Elle renferme alors 25 à 30 pour cent d'eau qu'on ne peut dégager que par un courant d'air à 50 ou 60°.

La tourbe brûle lentement, et ne donne pas une chaleur intense. Elle est d'un très bon usage pour le chauffage des étuves, et peut servir avantageusement à l'alimentation des foyers de chaudières à vapeur. Mais elle répand pendant sa combustion une odeur piquante et fort désagréable.

177. *Puissance calorifique.* La qualité des tourbes étant extrêmement variable, même dans chaque exploitation, et la quantité de terre qu'elles renferment l'étant également et dans des limites très-étendues, on conçoit facilement qu'il est impossible de rien dire de bien positif sur la quantité de chaleur que donne la combustion de la tourbe. D'après les expériences de MM. Blavies et Miché, il paraîtrait qu'une tourbe de bonne qualité donne tout au plus la cinquième partie de la chaleur que produit le même poids de houille.

Mais des expériences faites plus récemment et sur une grande échelle,

par M. Garnier, ingénieur des mines, indiquent pour ce combustible une puissance calorifique beaucoup plus grande.

Ces expériences ont été faites sur la tourbe des marais de Brêles, près de Beauvais. Les tourbes de ces marais sont d'un gris-noirâtre, sans mélange de substances terreuses; elles éprouvent un grand retrait par leur dessiccation, car leur longueur, qui est d'abord d'environ trois cent vingt-cinq millimètres, se réduit au tiers. On distingue dans cette localité six variétés de tourbes : les deux dernières ne sont bonnes que pour faire des cendres ; la seconde qualité coûte à Beauvais, tous frais compris, 14 f. 60 c. la corde pesant 2000$^{k}$ et composée de 4500 tourbes d'environ un décimètre cube.

Les essais ont eu lieu sur la chaudière d'une machine à vapeur à haute pression, et de la force de vingt chevaux, de MM. Halette et compagnie. M. Garnier a trouvé que, pour produire le même effet avec la houille et la tourbe de seconde qualité, il fallait employer un poids double de ce dernier combustible. Il résulte de là, qu'à Beauvais, où l'hectolitre de houille de 80$^{k}$ coûte 4 f. 20 c., les dépenses pour produire le même effet avec la houille et la tourbe de deuxième qualité de Brêles, sont comme 4 : 1.

La tourbe limoneuse des environs d'Essonne, de première qualité, me paraît approcher beaucoup de celle dont il vient d'être question, car, d'après des expériences faites avec soin, elle ne laisse après sa combustion que 7,41 pour 100 de cendres.

Voici encore un renseignement qui conduit à la même conséquence. Une machine à vapeur de 16 chevaux consomme en 12 heures 45 sacs de tourbes de 50$^{k}$ ou 2250$^{k}$, ce qui fait 140$^{k}$ par cheval, et 11$^{k}$,6 par cheval et par heure. C'est à peu près le double du poids de houille qu'exigerait la machine si elle était alimentée par ce dernier combustible.

178. D'après M. Sauvage, ingénieur des mines, la tourbe de Bar (Ardennes) est composée ainsi qu'il suit : carbone 0,22; matières volatiles 0,67; cendres 0,11. Il estime à 0,16 la valeur en carbone des matières volatiles, ce qui porterait à 0,38 la valeur de la tourbe sèche en carbone; et il dit que cette tourbe desséchée à l'air, a la même puissance calorifique que le bois. Ce dernier résultat tient très-probablement à ce que ces tourbes renferment plus d'eau ou plus de cendres que celles de Beauvais.

179. Le tableau suivant renferme les résultats des analyses faites par M. Regnault sur la composition des tourbes. Nous avons inséré dans ce tableau les puissances calorifiques de ces combustibles, en supposant que la chaleur produite résultât uniquement de la combustion du carbone et de l'hydrogène en excès. Nous avons fait ces calculs dans deux hypothèses, en prenant d'abord pour les puissances calorifiques de l'hydrogène et du carbone, les nombres 23800 et 7800 qui étaient admis avant les recherches de Dulong, et ensuite les nombres 34742 et 7170, qui résultent des expériences de ce physicien.

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | COMPOSITION. | | | | HYDROGÈNE en excès. | Puissance calorifique, en admettant pour le carbone 7800 pour l'hydrogène 23800. | Puissance calorifique, en admettant pour le carbone 7170 pour l'hydrogène 34742. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Carbone. | Hydrog. | Oxyg. | Cendres. | | | |
| Tourbe de Vulcaire près Abbeville..... | 57,05 | 5,63 | 31,76 | 5,58 | 1,69 | 4849 | 4673 |
| Tourbe de Long près Abbeville..... | 58,09 | 5,93 | 31,37 | 4,61 | 2,04 | 5013 | 4873 |
| Tourbe du Champ-du-Feu près de Framont..... | 57,79 | 6,11 | 30,97 | 5,33 | 2,30 | 5051 | 4943 |

180. D'après ce tableau, la puissance calorifique de la tourbe excéderait de beaucoup celle du bois, parce qu'elle renferme plus de carbone et plus d'hydrogène en excès; elle excède même la moitié de celle de la houille qui n'atteint jamais 8000, comme nous le verrons bientôt. Mais il faut remarquer que les essais ont été faits sur des tourbes complétement desséchées; et comme les tourbes telles qu'elles sont livrées à la consommation, ont été seulement desséchées par leur exposition à l'air, elles renferment encore de l'eau en proportion très-variable. Cette circonstance ne permet alors d'estimer la puissance calorifique des tourbes qu'autant qu'on connaît la quantité d'eau qu'elles renferment.

En admettant que les tourbes longtemps exposées à l'air renferment encore 25 pour cent d'eau, comme plusieurs expériences l'indiquent, on trouverait pour leur puissance calorifique, d'après le tableau précédent,

à peu près 3600; nombre qui s'éloigne peu de la puissance calorifique du bois parfaitement sec, et de la moitié de celle de la houille de bonne qualité, comme les expériences en grand l'indiquent.

181. Pour les tourbes, encore plus que pour le bois, il y aurait un grand avantage à enlever complétement l'eau qu'elles renferment, par une dessiccation faite au moyen d'un courant d'air chaud. Et cette dessiccation serait d'autant plus utile, que la chaleur qu'elle exigerait pouvant être fournie par la chaleur perdue dans presque tous les appareils de chauffage, ne coûterait rien. Lorsque la tourbe est desséchée, elle développe réellement plus de chaleur malgré la diminution de son poids, sa combustion est plus vive et produit une plus haute température. Pour tous les usages métallurgiques, la dessiccation complète de la tourbe est indispensable.

182. *Pouvoir rayonnant.* D'après plusieurs expériences, j'ai trouvé que la tourbe rayonne sensiblement autant de chaleur que le charbon de tourbe dont nous allons parler.

## § 6. — CHARBON DE TOURBE.

183. Le charbon de la tourbe peut s'obtenir, comme celui du bois, par deux procédés différents, par suffocation et par distillation. Ces deux procédés s'exécutent comme pour la carbonisation du bois.

184. La carbonisation de la tourbe, par le procédé généralement employé dans les forêts pour la carbonisation du bois, présente beaucoup plus de difficultés, attendu que la masse s'affaisse davantage, et qu'il se forme des crevasses nombreuses par lesquelles l'air s'introduit dans le fourneau. Malgré la difficulté de conduire l'opération, la carbonisation en meule est encore la seule usitée dans le Nord. Il est probable que l'opération serait plus facile à conduire et donnerait de meilleurs résultats, si on employait les dispositions imaginées pour la carbonisation du bois, par MM. Baillet ou Schwartz.

La meilleure méthode serait la distillation en vase clos; mais elle exige des appareils trop compliqués, et n'est réellement pas praticable en grand.

185. Les essais de carbonisation de la tourbe se font facilement dans un creuset de platine ou d'argent, et même dans une marmite de fer, que

l'on ferme après y avoir introduit un poids connu de tourbe, et que l'on soumet ensuite à la chaleur rouge jusqu'à ce qu'il ne se dégage plus de vapeurs. Les vases d'argile ne conviendraient point pour cette opération, parce que la plupart sont perméables à l'air, et qu'une partie du charbon pourrait être brûlé. J'ai trouvé ainsi, que cent parties de tourbe d'Essonne carbonisée en vase clos donnent 40,75 de charbon.

186. D'après M. Blavier, la tourbe de Vesle, distillée en vase clos, donne pour résidu un charbon compacte, dont le poids est de 34,7 pour cent parties de tourbe. En grand on a obtenu de 40 à 41. On peut admettre comme un résultat qui s'éloigne peu de la réalité, que les charbons provenant de tourbes de bonne qualité contiennent de 14 à 18 pour cent de cendres.

187. D'après M. Sauvage, on fabrique le charbon de tourbe dans les Ardennes avec la tourbe de Bar, dans des fours en maçonnerie; le produit est de 44 pour cent; et le charbon est formé de 0,32 de matières volatiles et combustibles, de 0,43 de carbone et de 0,25 de cendres.

188. Le charbon de tourbe développe dans sa combustion les produits qui se forment dans celle du charbon de bois; mais les gaz qui se dégagent ont une odeur piquante fort désagréable.

189. *Puissance calorifique.* Le charbon de tourbe renfermant toutes les cendres que contenait la tourbe qui l'a produit, et ces quantités étant très-inégales dans les différentes tourbes, la quantité de chaleur qu'il dégage par sa combustion est très-variable. On peut cependant regarder le charbon de tourbe comme devant produire une quantité de chaleur égale à celle qui serait produite par le charbon pur qu'il contient. Le charbon de tourbe d'Essonne, sur 100 parties, donnant 18,2 de cendres, résultat moyen de plusieurs expériences faites avec beaucoup de soin, il en résulte que sa puissance calorifique est 5800.

190. Le charbon de tourbe brûle lentement, du moins quand il n'est pas remué, parce que les cendres qu'il produit en grande quantité restent en place et ralentissent la circulation de l'air à la surface du charbon.

191. *Pouvoir rayonnant.* La quantité de calorique rayonnant que dégage le charbon de tourbe pendant sa combustion est très-considérable. Voici le résultat d'une expérience que j'ai faite avec l'appareil décrit (108).

L'air atmosphérique était à 23°; l'eau introduite dans le vase à 18,75.

Par la combustion de 39 grammes de combustible, la température de l'eau s'est élevée à 27°,25. Ainsi, la quantité de chaleur rayonnante absorbée par l'eau avait élevé la température de sa masse de 8°,50. La quantité d'eau étant toujours de 11$^{k}$,29, et le poids du vase de 2$^{k}$,223, la quantité de chaleur réellement absorbée était de $(11^{k},29 + 2,223 \times 0,11) \times 8^{0},50 = 98$ unités de chaleur. La quantité totale de chaleur rayonnée était donc $98 \times 1,36 = 133,28$. Or, les 39 grammes de matières combustibles qui ont été brûlées, et que l'on peut considérer comme du charbon pur, ont dû produire $7170 \times \frac{39}{1000} = 280$.

Ainsi, la quantité de chaleur rayonnée est à la quantité de chaleur produite :: 133 : 280 :: 1 : 2,1. Et la quantité de chaleur rayonnée est à celle qui est entraînée par le courant d'air :: 1 : 1,1.

Ce rapport est un peu trop grand, par les mêmes raisons que nous avons exposées en parlant du rayonnement du charbon de bois (167); en prenant les nombres 1 et 2,2 pour le premier rapport, on s'éloignera fort peu de la vérité.

## § 7. — COMBUSTIBLES FOSSILES.

### LIGNITES. HOUILLES. ANTHRACITES.

192. Les différents combustibles que nous avons examinés jusqu'ici ont tous une origine végétale évidente. Ceux qui nous restent à étudier ont probablement tous aussi la même origine, mais elle n'est manifeste que dans certains lignites. Les houilles et les anthracites ont une pâte homogène dans laquelle il est impossible de découvrir les plus légères traces de structure organique; mais comme il y a un passage continu des lignites qui ont conservé la structure des plantes qui les ont formés, aux houilles et aux anthracites, il n'est pas permis de douter de la communauté d'origine de ces différentes substances.

193. Quoi qu'il en soit, la tourbe appartient aux terrains d'alluvion les plus modernes; au-dessous, dans les terrains tertiaires, se trouvent les lignites; on les rencontre encore dans les couches supérieures des terrains secondaires, mais ils disparaissent des couches inférieures qui ne contiennent plus que de la houille; enfin les terrains intermédiaires renferment l'anthracite. Il semble, d'après cela, que la formation de

l'anthracite remonte à l'époque la plus reculée, que la houille est moins ancienne, et le lignite plus moderne encore.

Nous n'entrerons pas dans les détails géologiques des gisements des combustibles fossiles, ni dans les détails des modes d'extraction : nous sortirions du cadre que nous nous sommes tracé; mais nous étudierons avec soin ces combustibles sous le rapport de leurs effets calorifiques.

*Lignites.*

194. Les lignites ont tantôt une couleur brune et une texture ligneuse, ou une apparence terreuse; d'autres fois ils sont noirs à structure ligneuse ou en masse homogène à cassure résineuse. Les lignites se distinguent par ces deux caractères, d'être en grande partie formés d'une matière soluble dans la potasse, désignée anciennement sous le nom d'acide ulmique, et de donner pour produit de leur distillation un charbon pulvérulent ou de même forme que la masse distillée. Jamais ces deux caractères ne se trouvent réunis, ni dans les houilles, ni dans les anthracites.

195. Les lignites terreux sont employés comme combustibles; il en est qui, par une plus profonde altération, ont acquis une structure schisteuse et sont accompagnés de pyrites, et pour cette raison sont employés dans d'importantes exploitations d'alun.

196. On trouve en France des dépôts plus ou moins considérables de lignite terreux aux environs de Soissons et de Laon, dans le département de l'Aisne; à Montdidier, dans le département de la Somme; à Sainte-Marguerite, près de Dieppe; à Ruelle, dans le département des Ardennes; à Polieuc, près d'Orange, dans le département de Vaucluse.

197. Les lignites compactes ont la plus grande analogie avec la houille: ils en portent souvent le nom, et la remplacent dans tous les usages qui n'exigent pas les qualités spéciales des houilles grasses. Le jayet appartient à cette espèce.

Les lignites compactes forment souvent des bancs d'une grande puissance qui donnent lieu à de grandes exploitations. En France, on en trouve dans les environs de Marseille, de Toulon, de Vaucluse, de Ruelle (Ardennes).

*Houilles. Anthracites.*

198. Les houilles sont toujours noires, tantôt schisteuses, tantôt compactes; elles donnent lieu à d'immenses exploitations. Sous le rapport de leur conduite au feu, on peut les ranger en cinq classes :

1° *Houilles grasses maréchales.* Ces houilles sont d'un beau noir et présentent un aspect gras caractéristique; leur poussière est brune. Elles éprouvent au feu une espèce de fusion pâteuse et donnent un coke très-boursouflé, brillant, mais léger et peu avantageux pour les opérations métallurgiques. De toutes les houilles maréchales, la plus estimée est celle de Saint-Étienne; après, vient celle de Mons, désignée sous le nom de *fine forge;* elle a moins de corps que celle de Saint-Étienne, et résiste moins au vent du soufflet. Cette houille, brûlée sur grille, produit une chaleur extrême; mais par sa fusion pâteuse elle intercepte le courant d'air, brûle les grilles et exige beaucoup de soin de la part du chauffeur.

2° *Houilles grasses et dures.* Ces houilles diffèrent des houilles maréchales par une moindre fusibilité; leur coke est plus dense et le meilleur pour les hauts fourneaux.

3° *Houilles grasses à longues flammes.* Ces houilles sont encore moins collantes que les précédentes, les fragments s'agglutinent seulement; ces houilles sont les meilleures pour les grilles. Sous ce rapport, la houille de Mons connue sous le nom de *flénu* est en première ligne. Le cannel-coal du Lancashire appartient à cette variété.

4° *Houilles sèches à longues flammes.* Ces houilles donnent un coke à peine fritté; souvent même les fragments n'ont qu'une adhérence très-faible. Elles sont employées pour les grilles; elles brûlent avec une flamme longue, mais de peu de durée, et ne peuvent pas produire une chaleur aussi intense que les houilles précédentes.

5° *Houilles sèches qui brûlent sans flammes.* Ces houilles donnent un résidu pulvérulent; elles brûlent difficilement et sont principalement employées pour la cuisson des briques et de la chaux, dans les brasseries pour la dessiccation du malt, et dans l'économie domestique.

199. *Anthracites.* L'anthracite ne change que très-peu d'aspect par la calcination, et les fragments ne se collent pas. Il brûle très-difficilement, et n'est guère employé en Europe que pour la cuisson

des briques et de la chaux ; mais aux États-Unis d'Amérique on en fait une consommation immense pour les foyers domestiques et pour les chaudières, et dans le pays de Galles on commence à l'employer dans les hauts fourneaux.

Les houilles, en sortant de la mine, ne renferment qu'une très-petite quantité d'eau qui ne s'élève jamais à 0,02 ; mais comme elles sont rarement abritées dans les transports et dans les lieux où elles sont accumulées, elles peuvent en contenir des quantités très-considérables, surtout quand elles sont menues.

200. *Composition des houilles.* Les premières analyses des combustibles fossiles ont été faites par Thomson; mais elles sont très-inexactes, parce que l'analyse organique n'avait pas atteint le degré de perfection auquel elle est parvenue. Quelques années après, Karstein a donné la composition d'un grand nombre de variétés de houilles ; mais, d'après M. Regnault, ces compositions, quoique plus exactes que celles de Thomson, sont loin de la vérité : la quantité d'hydrogène y est trop faible presque constamment de moitié.

201. Le tableau suivant donne, d'après M. Regnault, la composition des lignites et des houilles. Les houilles, avant d'être analysées, avaient été complétement desséchées à la température de 120°. Les pertes ont varié de 1,36 à 1,60. La quantité d'azote est en général très-faible dans les anthracites et dans les autres combustibles, elle varie de 1,5 à 2. D'après cela, on a regardé les volumes réunis de l'oxygène et de l'azote comme représentant le volume du premier gaz.

J'ai ajouté à ce tableau les puissances calorifiques des combustibles, en admettant qu'elles résultent du carbone et de l'excès d'hydrogène qu'ils contiennent et, en prenant d'abord les chiffres 7800 et 23640 pour les puissances calorifiques du carbone et de l'hydrogène, et ensuite les nombres qui résultent des expériences de Dulong.

| DÉSIGNATION des COMBUSTIBLES. | LIEUX d'où ILS PROVIENNENT. | DENSITÉ. | NATURE du COKE. | POIDS DU COKE. | COMPOSITION. CARBONE. | HYDROGÈNE. | OXYGÈNE ET AZOTE. | CENDRES. | HYDROGÈNE EN EXCÈS. | PUISSANCE CALORIFIQUE, en prenant 7800 pour le carb. et 33640 pour l'hydrogène. | PUISSANCE CALORIFIQUE, en prenant 7170 pour le carb. et 34742 pour l'hydrogène. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **COMBUSTIBLES DE LA FORMATION CARBONIFÈRE.** | | | | | | | | | | | |
| Anthracites. . . | Pensylvanie. . . . . | 1,462 | Pulvérulent. . . | 84,83 | 90,45 | 2,43 | 2,45 | 4,67 | 2,09 | 7553 | 7211 |
| | Pays de Galles. . . . . | 1,348 | *Dito*. . . . . | 89,72 | 92,56 | 3,33 | 2,53 | 1,58 | 2,98 | 7923 | 7672 |
| | Mayenne. . . . . | 1,367 | *Dito*. . . . . | 89,96 | 91,98 | 3,92 | 3,16 | 0,94 | 3,48 | 7999 | 7614 |
| | Rolduc. . . . . | 1,343 | *Dito*. . . . . | 86,96 | 91,45 | 4,18 | 3,12 | 2,25 | 3,95 | 8066 | 7930 |
| Houilles grasses et dures. . . . | Alais (Rochebelle). . . . | 1,322 | Boursouflé. . . . | 76,29 | 89,27 | 4,85 | 4,47 | 1,41 | 4,23 | 7892 | 7869 |
| | Rive-de-Gier (P. Henry). | 1,315 | *Dito*. . . . . | 73,34 | 87,85 | 4,90 | 4,29 | 2,96 | 4,30 | 7868 | 7793 |
| Houilles grasses maréchales. . . | Rive-de-Gier, 1. . . . . | 1,298 | Très-boursouf. | 66,72 | 87,45 | 5,14 | 5,63 | 1,78 | 4,36 | 7851 | 7437 |
| | (Grand'Croix), 2. . . . | 1,302 | *Dito*. . . . . | 68,36 | 87,79 | 4,86 | 5,91 | 1,44 | 4,04 | 7802 | 7554 |
| | Newcastle (Richardson). | 1,280 | *Dito*. . . . . | » | » | 87,95 | 5,24 | 5,41 | 1,40 | 4,49 | 7921 | 7866 |
| Houilles grasses à longues flammes. . . . . | Flenu de Mons, 1. . . . | 1,276 | Boursouflé. . . . | » | » | 84,67 | 5,29 | 7,94 | 2,10 | 4,18 | 7592 | 7523 |
| | . . . . . 2. . . . | 1,292 | *Dito*. . . . . | » | » | 83,87 | 5,42 | 7,03 | 3,68 | 4,44 | 7590 | 7556 |
| | Rive-de-Gier... Cimetière, 1. | 1,288 | *Dito*. . . . . | 67,33 | 82,04 | 5,27 | 9,12 | 3,57 | 4,00 | 7344 | 7270 |
| | Rive-de-Gier... . . . . 2. | 1,294 | *Dito*. . . . . | 66,11 | 84,83 | 5,61 | 6,57 | 2,99 | 4,69 | 7724 | 7853 |
| | Rive-de-Gier... Couzon.. 1. | 1,298 | *Dito*. . . . . | 61,88 | 82,58 | 5,59 | 9,11 | 2,72 | 4,32 | 7462 | 7420 |
| | Rive-de-Gier... . . . . 2. | 1,311 | *Dito*. . . . . | 60,28 | 81,71 | 4,99 | 7,98 | 5,32 | 3,88 | 7290 | 7206 |
| | Lavaysse. . . . . | 1,284 | *Dito*. . . . . | 52,77 | 82,12 | 5,27 | 7,48 | 5,13 | 4,23 | 7405 | 7357 |
| | Lancashire (Cannelcoal) | 1,317 | *Dito*. . . . . | 55,35 | 83,75 | 5,66 | 8,04 | 2,55 | 4,54 | 7605 | 7582 |
| | Épinac. . . . . | 1,353 | *Dito*. . . . . | 59,97 | 81,12 | 5,10 | 11,25 | 2,53 | 3,53 | 7161 | 7034 |
| | Commentry. . . . . | 1,319 | *Dito*. . . . . | 63,16 | 82,72 | 5,29 | 11,75 | 0,24 | 3,65 | 7314 | 7158 |
| Houilles sèches à longues flamm. | Blanzy. . . . . | 1,362 | Fritté. . . . . | 54,72 | 76,48 | 5,23 | 16,01 | 2,28 | 3,09 | 6695 | 6556 |
| **COMBUSTIBLES DES TERRAINS SECONDAIRES.** | | | | | | | | | | | |
| Anthracite. . . | Lamure. . . . . | 1,362 | Pulvérulent. . . | 89,5 | 89,77 | 1,67 | 3,99 | 4,57 | 1,49 | 7354 | 7048 |
| *Dito*. . . . . | Macot. . . . . | 1,919 | *Dito*. . . . . | 88,9 | 71,49 | 0,92 | 1,12 | 26,47 | 0,79 | 5762 | 5400 |
| Houille. . . . | Obernkirchen. . . . . | 1,279 | Très-boursouf. | 77,8 | 89,50 | 4,83 | 4,67 | 1,00 | 4,27 | 7990 | 7900 |
| *Dito*. . . . . | Céral. . . . . | 1,294 | Fritté. . . . . | 53,3 | 75,38 | 4,74 | 9,02 | 1,86 | 3,66 | 6744 | 6688 |
| *Dito*. . . . . | Noroy. . . . . | 1,410 | Pulvérulent. . . | 51,2 | 63,28 | 4,35 | 13,17 | 19,20 | 2,77 | 5589 | 5297 |
| Jayet. . . . . | Saint-Girons. . . . . | 1,316 | Fritté. . . . . | 42,5 | 72,94 | 5,45 | 17,53 | 4,08 | 3,35 | 6481 | 6394 |
| *Dito*. . . . . | Bélertat. . . . . | 1,305 | *Dito*. . . . . | 42,0 | 75,41 | 5,79 | 17,91 | 0,89 | 3,64 | 6761 | 6444 |
| **COMBUSTIBLES DES TERRAINS TERTIAIRES.** | | | | | | | | | | | |
| Lignite parfait. . | Dax. . . . . | 1,272 | Pulvérulent. . . | 49,1 | 70,49 | 5,59 | 18,93 | 4,99 | 3,32 | 6242 | 6207 |
| *Dito*. . . . . | Bouches-du-Rhône. . . . | 1,254 | *Dito*. . . . . | 41,1 | 63,88 | 4,58 | 18,11 | 13,43 | 2,41 | 5552 | 5437 |
| *Dito*. . . . . | Mont-Mésiner. . . . . | 1,351 | *Dito*. . . . . | 48,5 | 71,71 | 4,85 | 21,67 | 1,77 | 2,25 | 6125 | 5923 |
| *Dito*. . . . . | Basses-Alpes. . . . . | 1,276 | *Dito*. . . . . | 49,5 | 70,02 | 5,20 | 21,77 | 3,01 | 2,59 | 6073 | 5921 |
| Lignite imparf. . | Grèce. . . . . | 1,185 | Analogue au | 38,9 | 61,20 | 5,00 | 24,78 | 9,02 | 2,03 | 5252 | 5093 |
| *Dito*. . . . . | Cologne. . . . . | 1,100 | charbon de | 36,1 | 63,29 | 4,98 | 26,24 | 5,49 | 1,83 | 5368 | 5173 |
| *Dito*. . . . . | Usnach (bois fossile). . . | 1,167 | bois. | » | » | 56,04 | 5,70 | 36,07 | 2,19 | 1,38 | 4697 | 4497 |
| Lignite passant au bitume. . . | Ellebogen. . . . . | 1,157 | Boursouflé. . . . | 27,4 | 73,79 | 7,46 | 13,79 | 4,96 | 5,81 | 7126 | 7309 |
| *Dito*. . . . . | Cuba. . . . . | 1,197 | *Dito*. . . . . | 39,0 | 75,85 | 7,25 | 12,96 | 3,94 | 5,70 | 7263 | 7418 |
| Asphalte. . . . | . . . . . | 1,063 | *Dito*. . . . . | 9,0 | 79,18 | 9,30 | 8,72 | 2,80 | 8,26 | 8130 | 8547 |

**202.** Il résulte de ces tableaux que, pour les houilles grasses maréchales la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près

de 11 pour cent, et que les quantités d'oxygène et d'hydrogène sont à peu près égales; que pour les houilles grasses et dures, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène est à peu près 9, et que la différence des poids de ces deux corps est encore très-petite; que pour les anthracites la somme de ces deux corps descend à 5 ou 6, et que la quantité relative d'hydrogène diminue; que pour les houilles sèches à longue flamme, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 16, et que la proportion d'hydrogène diminue; enfin, que dans les lignites, la somme des quantités d'oxygène et d'hydrogène s'élève jusqu'à 25, et qu'en même temps la proportion d'hydrogène diminue. Ainsi les houilles grasses passent aux houilles sèches non flambantes par la diminution de l'oxygène et de l'hydrogène, et aux houilles sèches flambantes, et aux lignites, par une augmentation de ces deux éléments, plus rapide pour l'oxygène que pour l'hydrogène.

Alors la faculté de se ramollir au feu ne provient pas comme on l'avait supposé, seulement de l'excès de l'hydrogène sur l'oxygène, mais encore de la quantité absolue de ces deux corps.

203. Comme nous l'avons déjà dit, on trouve une infinité de variétés de houilles entre les lignites et les houilles grasses maréchales, et entre ces dernières et les houilles sèches non flambantes.

204. La houille se vend à la voie de 15 hectolitres ras. Sur les mines l'hectolitre comble est plus usité; 4 hectolitres combles valent à peu près 5 hectolitres ras. La voie de la plupart des mines de Mons pèse à très peu près 1200 kil.

Voici le poids de l'hectolitre ras de houille de diverses localités.

| | |
|---|---|
| Houille de la mine de Labarthe | 88[k] |
| Houille d'Auvergne et de Blanzy | 87 |
| Houille de la mine de Combelle | 86 |
| Houille de la mine de Lataupe | 85 |
| Houille de la mine de Saint-Étienne | 84 |
| Houille de Decise | 83 |
| Houille du Creusot | 79 |
| Houille de Mons | 80 |

Ces nombres doivent un peu varier avec la grosseur des morceaux de houille, avec la manière de mesurer, et avec l'humidité plus ou moins grande de la houille.

205. Les quantités de cendres que produisent les houilles dans les foyers, excèdent de beaucoup celles qui sont données par les analyses chimiques, parce que ces cendres contiennent toujours une certaine quantité de coke. Le tableau suivant renferme les résultats obtenus à la fabrique de tabac de Paris : on a opéré sur plus de 600$^{k}$ de houille.

*Quantités de cendres, scories et parcelles de coke, produites par différentes houilles à l'état de gaillettes.*

| | |
|---|---|
| Houille dite ancien Anzin | 0,079 |
| Houille de Newcastle (collante) | 0,071 |
| Houille de Denain (collante) | 0,082 |
| Houille dite nouvel Anzin (collante) | 0,057 |
| Houille de Decize (collante) | 0,101 |
| Houille des veines de Mathon et du Buisson | 0,095 |
| Houille dite Flenu première qualité | 0,095 |

206. Les charbons provenant de la même mine se distinguent en gros, gaillette et menu, et ces différentes sortes, qui ne diffèrent que par la grosseur des morceaux, se vendent à des prix très-différents. A Saint-Étienne, le gros charbon se vend 2 francs les 100$^{k}$; la gaillette, 1,25; le menu 0,25 à 0,50. Les charbons menus sont peu estimés, parce que partout, excepté en France, on ne les emploie pas pour les grilles; ils ne servent généralement qu'à la fabrication du coke, et à la préparation des briquettes (pâte de houille menue et de $\frac{1}{15}$ d'argile), qui sont employées dans le chauffage domestique. Dans les grands charbonnages il est difficile de vendre tout le menu qu'on extrait, et partout il en reste des masses énormes sur les lieux d'exploitation. D'après M. Landrin, sur les 25,000,000 de quintaux métriques exploités en France, plus de 12,000,000 de menu restent sans usage. Le même ingénieur pense qu'on pourrait facilement les utiliser en leur faisant éprouver une légère calcination seulement suffisante pour les agglomérer; le résidu serait analogue à la houille maigre.

207. L'Angleterre est le pays le plus riche en houille; les Pays-Bas et la France viennent ensuite; les autres contrées du globe n'offrent que des exploitations beaucoup moins importantes. Le tableau suivant indique à peu près les quantités de houilles extraites annuellement dans les différents pays.

| Pays. | Quintaux métriques. |
|---|---|
| Angleterre | 75,000,000 |
| Pays-Bas, Belgique, provinces prussiennes rhénanes, duché du Luxembourg | 31,000,000 |
| France | 20,000,000 |
| Prusse et Silésie | 3,000,000 |
| Hanovre et principautés de la Confédération germanique | 3,000,000 |
| États-Unis d'Amérique | 1,500,000 |
| Saxe | 600,000 |
| Autriche | 340,000 |
| Bavière | 160,000 |

Ce tableau, qui date de plusieurs années, présente certainement des quantités beaucoup trop petites, surtout pour la Belgique et la France. Pour la France, en 1834, la production de houille était de 25,000,000 de quintaux métriques. D'après les Annales des mines, à la même époque, la production de la France en combustibles minéraux était telle que l'indique le tableau suivant :

| NATURE DU COMBUSTIBLE. | POIDS EN QUINTAUX MÉTRIQUES. | VALEUR EN FRANCS. |
|---|---|---|
| Houille... d'après les relevés officiels. | 19,919,656 | 18,723,656 |
| Lignite... d'après les relevés officiels. | 873,743 | 779,369 |
| Anthracite. d'après les relevés officiels. | 548,057 | 767,871 |
| $\frac{1}{6}$ en sus pour évaluations incomplètes. | 3,556,914 | 3,378,449 |
| Tourbe | 3,372,184 | 2,995,738 |
| | | 26,644,883 |

Nous donnerons sur les houillères qui approvisionnent Paris quelques détails tirés d'un mémoire de M. Michel Chevalier, imprimé en 1830 dans les Annales de l'industrie.

208. De 1818 à 1827, la consommation de Paris s'est élevée de 437,000 à 939,000 hectolitres ras. Alors la consommation de la banlieue ne dépassait pas 300,000$^{h}$. En comptant l'hectolitre à 80$^{k}$, la consommation de Paris et de la banlieue était environ de 900,000 quintaux métriques.

Dans cette quantité, les charbons du Nord figuraient à peu près pour moitié. Depuis, la consommation a beaucoup augmenté.

209. Les mines qui alimentent Paris, sont celles de Mons, d'Anzin, d'Aniche, de Saint-Étienne, d'Auvergne, de Blanzy, du Creusot, de Decize, de Fins, et d'Épinac.

210. En allant de l'extérieur au centre du bassin de Mons, on trouve d'abord des veines de charbon sec, brûlant sans flamme et sans fumée, très-propre à la cuisson de la chaux et des briques; sa densité est 1,3; au feu il perd de 11 à 14 pour cent. Ce charbon, à structure schisteuse, a peu de consistance : il n'est pas exporté. Après vient le charbon *fine forge*, principalement employé pour la forge; il est fragile, friable, sans être cependant pulvérulent et tachant comme le précédent. Ce charbon est très-propre à la fabrication d'un coke serré très-bon pour la métallurgie; son rendement en coke est en grand de 65 à 68 pour cent; sa densité est de 1,27. Dans des essais en petit, la perte par la calcination a été de 24 pour cent, et on a trouvé de 1,11 à 2,15 pour cent de cendres. Le coke fait en grand avec de la houille en morceaux a donné 4 pour cent de cendres, et celui qui provenait du menu un peu inférieur 11 pour cent. La houille *fine forge* de Mons est moins bonne pour la forge que celle de Saint-Étienne. Les exploitations de cette houille sont les plus infectées de *grisou*.

Au-dessous se trouvent les *charbons durs;* ils se distinguent des précédents par des plans de clivage, les uns perpendiculaires, les autres parallèles aux couches; les fragments affectent ordinairement une forme rectangulaire. Les charbons durs sont collants, et donnent de très-bon coke pour les fonderies et les hauts fourneaux; ils conviennent à la grille, sur laquelle ils brûlent avec une chaleur vive et soutenue; mais ils sont lents à s'embraser. En grand ils donnent 55 pour cent de coke. Dans des essais de laboratoire, on a trouvé de 1,287 à 1,262 pour sa densité, et de 1,22 à 4,4 pour cent de cendres.

Au centre du bassin on trouve un charbon désigné sous le nom de *flenu*, qui a acquis une grande réputation. Le *flenu* est brillant, bien taillé en rhomboïdes obliques; les faces portent des stries caractéristiques; il ne se réduit pas en poussière, mais en fragments à surface lisse. Il est facile à embraser, et brûle avec une flamme longue, vive et claire; il renferme très-peu de cendres et de pyrites, et ne donne que peu de

mâchefer; il est assez collant pour que le menu ne passe pas à travers la grille, mais pas assez pour s'agglutiner de manière à intercepter le courant d'air; toutes ces conditions réunies forment du *flenu* le meilleur charbon pour grilles. Le coke du flenu est moins serré et moins dur que celui qui provient des charbons durs et de *fine forge,* et serait moins convenable pour les travaux métallurgiques. Sa densité varie de 1,254 à 1,30; la perte au feu s'élève de 29 à 38 pour cent. Le charbon *flenu,* qui est pyriteux et en poussière, s'échauffe lorsqu'il est conservé en grande masse, et s'embrase quelquefois. Le *flenu* est le seul charbon de Mons qui arrive à Paris en grande quantité.

Les charbons de Mons en morceaux d'environ un décimètre cube, portent le nom de *gaillette.* Ceux qui sont entraînés par un râteau dont les dents sont espacées de 6 à 7 centimètres, portent le nom de *gailletterie.* Ce qui échappe au râteau porte le nom de *fin.* Les charbons flenu et durs sont vendus à des prix différents à l'état de gaillette, de gailletterie et de *fins;* les charbons *fine forge* se vendent tels qu'ils sortent du puits.

Les mines de Mons produisent annuellement de 12 à 13 millions d'hectolitres combles. Les charbons se vendent sur le rivage du canal de Mons à Condé. L'unité de mesure est le *muid,* qui équivaut à 4 mannes ou hectolitres combles. Le poids de l'hectolitre comble de gaillette flenu varie de 106 à 120 kil. Celui du gros de charbon dur est d'environ 125 kilog.; et celui du charbon fine forge gailletteuse de 100 à 110 kilog.

211. C'est le même bassin houiller qui est exploité à Anzin, à Raismes, à Denain, à Fresne et à Vieux-Condé. Mais les charbons de ces différentes exploitations diffèrent complétement.

Le charbon d'Anzin est gras, collant, tenant bien le feu, peu sulfureux et assez propre à la fabrication du coke, médiocrement convenable à la forge comparé à celui de Saint-Étienne et même au *fine forge* de Mons. Il présente beaucoup d'analogie avec le charbon dur de Mons. Il est employé pour grille, mais il est inférieur au *flenu,* parce qu'il est plus terreux, qu'il donne plus de mâchefer, qu'il se boursoufle sur la grille et fatigue le chauffeur. Suivant la grosseur des morceaux, il est vendu sous le nom de *gros* ou *gaillette,* ou de *gailletteux,* ou de *forge gailletteuse.* Des essais de laboratoire ont donné

1,284 pour sa densité, 25 pour la perte au feu et 3,50 pour cent de cendres.

Le charbon de Raismes est un charbon de grille, maigre, plus brillant et plus gailletteux que celui d'Anzin; mais il est plus sulfureux, plus difficile à embraser, il brûle plus lentement et donne une chaleur moins vive.

Le charbon de Fresnes et de Vieux-Condé est un charbon sec, analogue à l'anthracite, brûlant lentement sans flamme ni fumée, tantôt solide, à cassure conchoïde, tantôt se divisant suivant des plans perpendiculaires au lit, d'autres fois fragile et portant des stries exactement pareilles à celles *du flenu*. Son usage spécial est la cuisson de la brique et de la chaux. Sa densité varie de 1,354 à 1,369; sa perte au feu est de 7,20 à 9,60; la quantité de cendres qu'il laisse après sa combustion est de 0,75 à 4,25.

212. Les charbons d'Aniche ont la plus grande analogie avec ceux d'Anzin, mais ils sont plus propres au travail de la forge et à la fabrication du coke. L'extraction annuelle était, en 1830, d'environ 300,000 hectolitres combles. Il en vient peu à Paris.

213. Le bassin houiller de Saint-Étienne et de Rive-de-Gier renferme deux espèces de houille. La première, la houille *maréchale,* si estimée pour la forge, est d'un beau noir, brillante, à structure schisteuse, tendre, très-collante et passablement pyriteuse. Sa densité est de 1,28 à 1,34 elle perd au feu de 30 à 33 pour cent; elle renferme de 2 à 2 $\frac{1}{2}$ de cendres. Elle brûle avec une chaleur extrême, et forme beaucoup de mâchefer. C'est un charbon plus chaud que le *flenu* de Mons, mais dont la combustion est plus difficile à régler. Dans les fours, il donne 60 pour cent de coke, et 50 par la calcination dans les fourneaux en plein air. La seconde variété de houille de Saint-Étienne diffère de la première en ce qu'elle est beaucoup plus inflammable et moins collante, et qu'elle convient mieux à la combustion sur grille.

214. Le charbon d'Auvergne est un charbon de grille; il donne un coke solide. Sa densité varie de 1,35 à 1,45. Sa combustion a lieu avec une flamme vive, claire, et une chaleur soutenue; il est un peu difficile à allumer, et convient aux grands foyers qui exigent une haute température. La concession de Combelle fournit un charbon différent qui ne colle pas, qui est facile à embraser, flambant, moins fragile, et qui

résiste moins bien au feu. Les mines d'Auvergne fournissent encore une houille sèche non flambante, propre à la cuisson de la brique et de la chaux.

215. Le charbon du Creuzot est brillant, peu schisteux, très-collant, et convenable pour la forge et la fabrication du coke. Il donne 68 pour cent de coke, et renferme 3,4 pour cent de cendres. On trouve encore au Creusot un gisement considérable de charbon maigre flambant, très-léger, dont la consommation est bornée.

216. Le charbon de Blanzy n'est pas collant, et par conséquent impropre à la fabrication du coke. Il est solide, non tachant, très-gailletteux, peu pierreux, mais pyriteux. Sur la grille il s'agglutine sans se boursoufler; il brûle avec une flamme vive mais de peu de durée; c'est un charbon léger, plus léger que le *flenu*. Au feu il perd 40 pour cent. On ne saurait l'employer aux usages qui exigent une forte chaleur, à moins de le mêler avec des houilles grasses. Exposé à l'air, il s'effleurit et perd une grande partie de sa puissance calorifique. Sa densité varie de 1,22 à 1,28.

Le charbon de Decize est flambant et sulfureux comme celui de Blanzy, mais plus collant et plus durable au feu; c'est un des charbons les moins estimés de ceux qui arrivent à Paris. Sa densité est 1,25; au feu il perd 30 pour cent.

217. Le charbon de Fins se rapproche beaucoup de celui de Saint-Étienne; il donne 70 pour cent de coke. Dans le même département (l'Allier) se trouvent les mines de Commentry, qui fournissent un charbon moins collant, moins bon à la forge, très-propre à la fabrication du coke et à la combustion sur grille, mais un peu pyriteux. Il produit 66 pour cent de coke.

218. Les couches de houille d'Épinac renferment deux espèces de ce combustible. La première est très-collante; elle se boursoufle au feu et brûle avec une grande vivacité. L'autre est plus terne, plus tachante, peu homogène, beaucoup plus terreuse et plus pyriteuse; elle est moins collante et donne moins de chaleur que la première.

219. *Anthracite.* L'anthracite est un combustible très-difficile à brûler; il en existe des mines puissantes dans les États-Unis d'Amérique, dans le pays de Galles et en France; mais on est loin, surtout en France, de l'utiliser dans tous les cas où l'on emploie la houille. Nous rapporte-

rons à ce sujet un extrait d'un mémoire très-intéressant de M. Michel Chevalier, inséré dans le journal d'architecture.

220. « Dans les États-Unis, l'État de Pensylvanie renferme trois gîtes puissants d'anthracite. L'exploitation de ces mines n'a produit, en 1820, que 371 tonnes; en 1830, la production était de 177,530 tonnes; et en 1839 elle s'est élevée à 798,122. La densité de l'anthracite de Pensylvanie varie dans les diverses localités. Dans le même bassin, l'inflammabilité est en raison inverse de la densité. La consommation de l'anthracite, restreinte d'abord à Philadelphie et à sa banlieue, s'est répandue au loin; actuellement les familles aisées de New-York, de Boston, de Washington et des autres cités du littoral, emploient exclusivement l'anthracite. Enfin, des essais récents paraissent devoir en étendre encore l'usage; car, à l'exemple de M. Crane qui a appliqué l'anthracite du pays de Galles à la fusion des minerais de fer, MM. Guiteau et Baughman, maîtres de forges à Mauch Chunk, près du Lehigh, en Pensylvanie, s'en sont servis avec succès dans leur haut fourneau, à l'exclusion de tout autre combustible.

221. « On n'est parvenu qu'à la longue à brûler l'anthracite sur des grilles, en petite quantité, pour les usages domestiques, et même à en tirer un parti quelconque. Ce fut la guerre qui, faisant sentir aux manufacturiers l'aiguillon de la nécessité, donna naissance à la pensée d'utiliser les gîtes d'anthracite pour la consommation des fabriques de la Pensylvanie, car alors on ne soupçonnait même pas qu'il pût jouer un rôle dans le chauffage des maisons. De 1812 à 1815, les escadres anglaises bloquaient étroitement les ports de l'Union. Installées audacieusement dans les baies de la Chesapeake et de la Delaware, elles commandaient de là les principaux passages. Les manufactures indigènes, accoutumées à s'approvisionner, par la voie maritime, des houilles de l'Angleterre, de la Virginie et de la Nouvelle-Écosse, étaient dans un embarras extrême. On songea donc au combustible minerai que la nature avait placé en masse aux sources du Schuylkill. On en fit venir à grands frais, en charrettes, par de mauvais chemins, jusqu'à Philadelphie, et on en chargea les fourneaux et les chauffes des chaudières, mais sans le moindre succès; l'anthracite se montra rebelle à tous les efforts. On varia les essais, mais toujours inutilement; et l'un des principaux manufacturiers de Philadelphie, M. J. P. Wetherill, me montrait,

en 1835, la place où vingt ans auparavant, désespérant de réussir, il avait fait creuser un trou en terre pour y enfouir ce charbon, regardé dès lors comme incombustible, et rebuté comme un jeu décevant de la nature.

« Cependant un accident vint démontrer positivement que l'anthracite pouvait s'embraser. Un tas d'anthracite gisait abandonné sur les bords du Schuylkill, près de la ville. Une nuit, le propriétaire d'une maison attenante fut réveillé en sursaut par une grande lueur accompagnée de décrépitements : c'était le monceau d'anthracite qui avait pris feu et qui flambait. On renouvela bientôt les essais, et cette fois on fut plus heureux. Actuellement, l'anthracite est employé à peu près à tous les usages possibles, domestiques et industriels.

222. « La France est riche en mines d'anthracite. Nous en avons sur les bords de la Mayenne, aux environs de Sablé, qui, utilisées pour la cuisson de la chaux, ont déjà produit une révolution dans l'agriculture des départements voisins. Dans l'Isère, le sol recèle une quantité considérable d'anthracite. On y trouve, à La Mure, des couches de 10 mètres et plus d'épaisseur. Il y a douze ou treize ans on essaya, mais sans succès, de se servir de l'anthracite de l'Isère pour la fusion des minerais de fer. On exploite également l'anthracite dans le département des Hautes-Alpes. Dans le bassin houiller d'Anzin, les couches de Fresnes et de Vieux-Condé sont formées d'anthracite. On commence à exploiter l'anthracite dans la Côte-d'Or. D'autres gîtes, peu connus, paraissent exister sur plusieurs points, et notamment dans le département de l'Allier, près de la célèbre mine de Commentry.

223. « Ce combustible n'est employé en France que pour la cuisson de la chaux et du plâtre, et pour le chauffage domestique des classes peu aisées ; car ce qui en est absorbé par d'autres usages, tels que la clouterie et le chauffage de quelques chaudières, est tout à fait borné : c'est donc un sujet qui mérite de fixer l'attention de l'administration et des industriels. Il est hors de doute que la consommation de l'anthracite s'étendrait beaucoup si l'on recourait à des appareils ou à des méthodes de fabrication en rapport avec sa nature. Ainsi, la parfaite réussite de la tentative de M. Crane, en Angleterre, pour appliquer l'anthracite à la fusion des minerais de fer, donne à penser que si l'on reprenait l'expérience de Vizille (Isère), en profitant des données nouvelles

du pays de Galles, ce serait cette fois avec profit. Les heureux essais opérés aux États-Unis, pour substituer l'anthracite au bois sur les bateaux à vapeur, autorisent à croire que sur quelques-uns de nos fleuves éloignés des mines de houille, ce combustible rendrait de grands services. Peut-être même là où la houille est à des prix assez modérés, lutterait-il avec avantage contre elle, à cause des caractères qui le distinguent. Partout où l'hiver est rigoureux, comme dans les départements de l'Isère et du Rhône, à Grenoble et à Lyon, ces caractères particuliers devraient lui mériter la préférence sur la houille pour le chauffage domestique, celle de toutes les destinations qui absorbe le plus de combustible. J'ai pu essayer à Paris, dans un poêle d'Olney, l'anthracite de Sablé, après en avoir séparé le poussier, et celui de l'Isère, qui est beaucoup moins pulvérulent, qui même ne l'est pas du tout, et qui ressemble à celui de la Pensylvanie. Dans ces expériences, l'anthracite français s'est comporté aussi bien que celui des États-Unis.

224. « L'exploitation de l'anthracite suit, en France, une marche progressive; voici comment elle s'est développée de 1814 à 1839, d'après les tableaux officiels de l'administration des mines :

*Exploitation de l'anthracite en France.*

| ANNÉES. | INDICATION DES DÉPARTEMENTS. | | | | TOTAL. |
|---|---|---|---|---|---|
| | HAUTES-ALPES. | ISÈRE. | MAYENNE. | SARTHE. | |
| | ton. | ton. | ton. | ton. | ton. |
| 1814 | » | 4,776 | » | » | 5,776 |
| 1815 | » | 5,823 | » | » | 5,823 |
| 1816 | » | 4,795 | » | » | 4,795 |
| 1817 | » | 4,641 | » | » | 4,641 |
| 1818 | » | 4,454 | » | 640 | 5,094 |
| 1819 | » | 5,036 | 1,235 | 1,888 | 8,159 |
| 1820 | » | 4,530 | 1,193 | 1,794 | 7,517 |
| 1821 | 100 | 4,361 | 542 | 760 | 5,763 |
| 1822 | 50 | 4,376 | 2,320 | 1,600 | 8,346 |
| 1823 | 100 | 4,634 | 1,820 | 2,900 | 9,454 |
| 1824 | 1,350 | 1,993 | 2,800 | 4,280 | 10,423 |
| 1825 | 500 | 6,909 | 6,340 | 9,980 | 23,729 |

| ANNÉES. | INDICATION DES DÉPARTEMENTS. | | | | TOTAL. |
|---|---|---|---|---|---|
| | HAUTES-ALPES. | ISÈRE. | MAYENNE. | SARTHE. | |
| | ton. | ton. | ton. | ton. | ton. |
| 1826 | 347 | 7,994 | 3,850 | 3,000 | 15,194 |
| 1827 | 1,620 | 9,364 | 4,426 | 10,760 | 25,870 |
| 1828 | 1,656 | 10,631 | 4,419 | 13,392 | 30,098 |
| 1829 | 2,590 | 10,694 | 7,051 | 12,672 | 53,007 |
| 1830 | 2,885 | 10,625 | 6,835 | 10,885 | 31,229 |
| 1831 | 1,475 | 10,689 | 8,296 | 10,638 | 31,098 |
| 1832 | 1,840 | 13,485 | 11,328 | 12,330 | 38,983 |
| 1833 | 2,205 | 15,572 | 15,563 | 12,528 | 45,869 |
| 1834 | 1,960 | 16,314 | 18,409 | 18,125 | 54,809 |
| 1835 | 1,832 | 17,022 | 23,190 | 16,437 | 58,481 |
| 1836 | 2,409 | 23,348 | 22,089 | 12,788 | 60,635 |
| 1837 | 2,220 | 23,397 | 22,494 | 20,286 | 69,157 |
| 1838 | 2,749 | 23,070 | 21,315 | 19,505 | 67,469 |

« Pendant que la production officiellement constatée d'anthracite s'élevait de 5,776 ton. à 67,469, après avoir atteint, en 1837, 69,157, celle de la houille montait de 646,534 ton. à 2,944,695.

« Si, pour prendre des termes de comparaison moins éloignés, on mettait en regard les deux années 1830 et 1838, on trouverait :

« Pour l'anthracite, une progression de 31,229 ton. à 67,469, ou de 116 pour cent.

« Pour la houille, une progression de 1,500,013 ton. à 2,944,695, ou de 96 pour cent.

« Il résulte du tableau précédent, que le progrès de l'exploitation de l'anthracite est dû principalement à l'emploi de la chaux comme amendement des terres dans la Sarthe et la Mayenne. Les usages métallurgiques, le chauffage domestique, celui des chaudières des manufactures et des bateaux à vapeur, opéreront en peu de temps, sous ce rapport, lorsqu'on le voudra bien, une révolution plus marquée encore. A cet égard, l'administration ne saurait trop exciter le zèle des hommes industrieux qui ont mis en valeur les mines de la Mayenne et de la Sarthe, et stimuler les détenteurs des mines de l'Isère, qui paraissent ignorer la fortune qu'ils ont entre les mains. Elle devra aussi reconnaître que c'est pour elle un devoir de

pousser à la consommation de ce combustible en encourageant ou en entreprenant à ses frais l'établissement des routes, des canaux ou des chemins de fer dont il a besoin pour s'écouler. »

225. *Puissance calorifique des houilles.* Le tableau pag. 89 renferme les puissances calorifiques des houilles calculées d'après leur composition, en admettant d'abord les nombres 7800 et 23640 pour celles du carbone et de l'hydrogène, et ensuite les nombres 7170 et 34742, qui résultent des expériences de Dulong. C'est une chose remarquable, que, malgré la différence de ces nombres, les puissances calorifiques pour le même combustible diffèrent fort peu. La moyenne de tous les nombres inscrits dans le tableau s'éloigne peu de 7600, qui correspond à une houille qui renfermerait 83,75 de carbone, 4,54 d'hydrogène en excès, le reste étant formé d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, et de matières étrangères. Ce même nombre correspond à $11^k,69$ d'eau réduite en vapeur, en supposant que toute la chaleur soit utilisée et que les cendres ne renferment point de coke. Voyons si les expériences faites sur une grande échelle s'accordent avec ce résultat.

226. Nous ne parlerons pas des nombreuses expériences qui ont été faites sur des chaudières à vapeur, en employant différentes espèces de houille, et qui avaient pour objet de reconnaître celles qui, dans les circonstances des expériences, produisaient le plus grand effet utile, parce que les différences observées pouvaient tenir aux dispositions du foyer qui n'était pas le plus convenable à chaque variété de houille, et que d'ailleurs dans aucun cas la température et la composition de l'air brûlé à son entrée dans la cheminée n'ont été déterminées. Mais nous rapporterons plusieurs expériences qui permettent de déterminer avec une suffisante exactitude la puissance calorifique des houilles employées.

227. Dans une expérience faite à Vesserling, on a obtenu $6^k,27$ de vapeur par kilogramme de houille ; la fumée était à 500 degrés, et contenait encore de 10 à 12 pour cent d'oxygène. Comme dans ce cas il faut à peu près 18 mètres cubes ou $23^k$ d'air pour brûler $1^k$ de houille, le nombre d'unités de chaleur entraînées par la fumée était de $\frac{23 \times 500}{4} = 2875$, ce qui correspondait à $\frac{2875}{650} = 4^k,4$ de vapeur. Il suit de là que, si toute la chaleur avait été utilisée, on aurait produit $6,27 + 4,4 = 10^k,67$ de vapeur ;

ce qui donne pour la puissance calorifique de la houille employée 6935. Et comme cette houille a donné de 14 à 20 pour cent de résidu, en moyenne 15, il faudrait ajouter $\frac{1}{10}$ au nombre précédent pour obtenir la puissance calorifique moyenne d'une houille qui ne renfermerait que 5 pour cent de cendres. Cette puissance calorifique serait alors 7629.

228. Voici enfin deux expériences faites avec beaucoup de soin, par une commission du comité des arts économiques, de la Société d'encouragement, qui ont donné des résultats bien voisins de ceux que nous venons de rapporter.

Dans une chaudière à vapeur d'une disposition particulière, à foyer intérieur et entièrement exposée à l'air, imaginée par Lemare, on a brûlé en trois heures cinquante minutes 36$^k$37 de houille, et on a vaporisé 297$^k$,75 d'eau. A ce produit il faut d'abord ajouter la chaleur perdue par le contact de l'air et par le rayonnement de la chaudière. La surface de la chaudière étant de 7 mètres, en admettant 1$^k$,87 pour la quantité de vapeur correspondante à la chaleur perdue par mètre carré et par heure, la perte par heure a été 13$^k$, et pour trois heures cinquante minutes, à peu près 50$^k$, qu'il faut ajouter aux 297,75 de vapeur produite, ce qui fait 347$^k$; nombre qui correspond à 9$^k$,55 de vapeur par kilogramme de houille. Enfin, il faut estimer en vapeur la chaleur perdue par la fumée. La température de la fumée et sa composition chimique n'ont point été observées; mais en supposant l'air à moitié brûlé, ce qui est le cas ordinaire, et la température seulement de 250 degrés, la quantité de vapeur correspondante serait pour chaque kilogramme de houille $\frac{23 \times 250}{4 \times 650} = 2{,}21$. Ainsi la puissance calorifique de la houille employée serait $(9{,}55 + 2{,}21) \times 650 = 11{,}76 \times 650 = 7644$.

229. Dans d'autres expériences faites avec une chaudière évaporatoire de Lemare, aussi à foyer intérieur, on a brûlé une fois 25 kilog. de bois et 91$^k$,1 de houille, pour évaporer 1001$^k$ d'eau en 5 heures; et une autre fois 20$^k$ de bois et 98$^k$,40 de houille pour vaporiser dans le même temps 1074$^k$ d'eau. En admettant que 1$^k$ de bois soit équivalent à $\frac{1^k}{2}$ de houille, les consommations de houille ont été de 103$^k$,6 et 108$^k$,40, et les quantités de vapeurs produites par 1$^k$ de houille, de $\frac{1001}{103{,}6} = 9{,}66$, et $\frac{1074}{108{,}4} = 9{,}90$. La surface libre de la chaudière étant de 7$^m$,32, la quantité de cha-

leur perdue estimée en vapeur était par heure de $7,32 \times 1,87 = 13,68$. Or, comme dans la première expérience on a consommé par heure $\frac{103,6}{5}$ $= 20^{k},72$, et dans la seconde $\frac{108,4}{5} = 21,68$, les quantités de vapeur pour chaque kilog. de houille, correspondantes aux quantités de chaleur perdues, sont $\frac{13,68}{20,72} = 0,66$ pour la première, et $\frac{13,68}{21,68} = 0,63$ pour la seconde, ce qui porte les quantités de vapeur qui auraient été produites sans le refroidissement de la chaudière, à $9,66 + 0,66 = 10,32$ pour la première expérience et à $9,90 + 0,63 = 10,53$ pour la seconde. Enfin, à ces deux nombres il faut ajouter la quantité de vapeur correspondante à la chaleur perdue par la fumée qui était à peu près à $200^{c}$; ce qui donne $\frac{200 \times 23^{k}}{4 \times 650} = 1,8$. Ainsi, la puissance calorifique du combustible déduite de la première expérience, est $12,12 \times 650 = 7878$, et celle qui résulte de la seconde est $12,33 \times 650 = 8014$. Le charbon employé dans les deux cas était du flenu de Mons, qui avait été choisi avec beaucoup de soin.

230. Il résulte de ce qui précède, que la puissance calorifique des houilles déduite des expériences faites sur une très-grande échelle, diffère bien peu de celle qui est indiquée par leur composition chimique; cette différence est aussi petite qu'on pouvait l'espérer, dans des expériences aussi délicates, et qui d'ailleurs renferment une cause d'erreur dont il est presque impossible d'évaluer l'influence : c'est la quantité d'eau entraînée mécaniquement par la vapeur.

Désormais nous admettrons le nombre 7500, pour la puissance calorifique d'une houille moyenne, et le même nombre pour les anthracites.

231. *Pouvoir rayonnant.* Je n'ai point fait d'expériences directes sur le rayonnement de la houille, à cause de la difficulté de la faire brûler en petite masse; mais d'autres expériences ne me permettent pas de douter qu'il ne soit supérieur à celui du charbon de bois.

## § 8. — DU COKE.

232. Le coke (*charbon de terre épuré*) n'est autre chose que la houille

privée des matières volatiles qu'elle renferme. Le coke est presque uniquement formé de charbon et des substances terreuses que contenait la houille dont il provient. Le coke brûle presque sans flamme, et ne peut se maintenir en ignition qu'autant qu'il est en grande masse dans un foyer fermé; à l'air libre il s'éteint. La combustion du coke ne donne naissance qu'à de l'acide carbonique et à de l'oxyde de carbone.

233. Le coke est gris de fer, souvent d'un éclat métallique; il est tantôt en masses poreuses, légères, analogues à la pierre ponce, tantôt en masses seulement frittées, tantôt en poudre. On n'emploie jamais le coke que dans le premier état; il est alors fourni par les houilles grasses.

234. On se sert de deux procédés différents pour la fabrication du coke, la distillation et la combustion.

La distillation est uniquement employée dans les fabriques de gaz-light; mais le but de l'opération est moins d'obtenir du coke que les gaz combustibles qui se produisent dans la décomposition de la houille. Le coke préparé par ce procédé n'est pas convenable pour le traitement du fer. Aussi, pour cet objet et pour presque tous les autres usages, on prépare le coke par la combustion.

La fabrication du coke par combustion s'opère de différentes manières. La plus usitée dans les grandes exploitations consiste à former, sur un terrain battu, une masse conique de houille en morceaux, de 5 à 6 mètres de diamètre, et de 1 mètre de hauteur, en plaçant les plus gros fragments vers le centre et ménageant dans l'axe une cheminée comme dans les fourneaux à charbon. On allume par la cheminée; la combustion se propage, et finit après un certain temps par atteindre toute la masse. On recouvre de poussier de coke les parties où l'activité du feu est trop grande. La carbonisation à l'air libre dure de 40 à 48 heures; elle est terminée lorsque, toute la masse étant incandescente, il n'en sort point de fumée, et quand la flamme, de longue et rougeâtre qu'elle était d'abord, est devenue courte et blanche. Lorsque ces caractères se manifestent, on étouffe le feu avec du poussier de coke, et quand la température est diminuée, on achève le refroidissement du coke en l'étalant sur le sol; quelquefois on l'arrose avec une certaine quantité d'eau. Maintenant on préfère donner aux tas la forme d'un

demi-cylindre allongé; les dimensions les plus ordinaires sont 10 à 20 mètres de longueur, 2 à 3 mètres de largeur et 0,60 de hauteur. Par cette disposition, on économise la place et la main-d'œuvre.

235. En France, on emploie de préférence la carbonisation dans les fours. Ces fours sont tantôt circulaires avec une seule cheminée au centre, tantôt allongés avec une porte à chaque extrémité et une ou deux cheminées. La houille est introduite dans les fours préalablement chauffés au rouge; la chaleur y est maintenue par la combustion d'une partie des gaz qui se dégagent, au moyen d'un courant d'air qui pénètre dans le four, ou par les fissures de la porte, ou par des ouvertures qu'on y a pratiquées, ou par des orifices placés de chaque côté; dans ce dernier cas, l'air est amené dans le four sur plusieurs points. Dans toutes les dispositions de fours, les cheminées sont très-courtes. Les charges varient ordinairement de 20 à 25 hectolitres, et l'opération dure de 24 à 48 heures.

Le produit en poids de 100 parties de houille varie beaucoup avec la nature de la houille. Le tableau suivant renferme les résultats des expériences faites, en 1838, à la manufacture de tabac de Paris, par une commission composée de MM. Clément, Gueniveau et Lefroy.

*Perte à la distillation.*

| | |
|---|---|
| Houille de Blanzy (Saône-et-Loire) | 0,44 |
| Newcastle (Angleterre) | 0,395 |
| Flenu première variété (Mons) | 0,39 |
| Houille de Decize (Nièvre) | 0,365 |
| Houilles des veines de Mathon et du Buisson (Belgique) | 0,36 |
| Houille flenu deuxième variété | 0,355 |
| Houille dite nouvel Anzin | 0,345 |
| Houille de Denain | 0,325 |
| Houille dite ancien Anzin | 0,255 |

236. Les fours donnent un plus grand produit que les meules, ils exigent moins de soin, et ne sont pas sujets aux accidents que la pluie et les grands vents peuvent occasionner dans les meules. Les fours sont surtout très-avantageux pour la carbonisation des houilles menues.

237. Quant au volume du coke produit, il varie avec la qualité des houilles, et pour une même houille avec le mode de carbonisation. Le rendement en volume est plus grand dans les meules que dans les fours.

En général, dans les grands appareils, le volume du coke diffère peu de celui de la houille qui l'a produit; cependant, pour les houilles très-grasses, le volume du coke excède souvent de 30 pour cent celui de la houille; pour les houilles maigres, il est plus petit.

Le mètre cube de coke à l'usage des hauts fourneaux pèse ordinairement 400 kilogrammes. A Paris, le coke provenant des usines à gaz pèse de 30 à 35 kilogrammes l'hectolitre comble; et celui qui provient des fours, de 40 à 45 kil.

238. En conduisant les fumées des fours à coke dans des chambres closes, le charbon léger qu'elles entraînent s'y dépose en grande partie; ce dépôt constitue le noir de fumée : la quantité qu'on en recueille forme à peu près la trentième partie de la houille employée.

239. La quantité de chaleur perdue dans la carbonisation de la houille est très-considérable; elle s'élève à près de la moitié de celle que peut donner la combustion complète de la houille, car le coke ne représente qu'environ la moitié du poids de la houille qui l'a produit, et les parties volatilisées sont celles qui développent le plus de chaleur.

Dans quelques usines, on utilise la chaleur qui se développe dans la fabrication du coke, en faisant passer la fumée sous des chaudières à évaporer, dans des canaux qui traversent des étuves, etc.

Mais pour utiliser le combustible perdu, il est indispensable de brûler complétement les gaz qui se dégagent des fours par l'introduction d'un courant d'air; autrement on n'obtient qu'une très-faible partie de la chaleur qu'ils peuvent produire.

On a prétendu qu'en utilisant la chaleur perdue dans les fours à coke on produisait dans la cheminée un plus grand tirage qui appelait une plus grande quantité d'air dans le fourneau, et que par suite on éprouvait une perte dans le rendement qui compensait et au delà l'avantage qui pouvait résulter de l'emploi de la chaleur des gaz; mais il est facile de se rendre maître du tirage et de ne faire passer dans le four que les quantités d'air nécessaires à l'opération.

240. *Puissance calorifique.* Je ne connais aucune expérience qui donne la quantité de chaleur développée par le coke; les expériences seraient d'ailleurs assez difficiles à faire, à cause de la faible combustibilité de ce corps; on suppose généralement au coke une puissance calorifique égale à celle du charbon de bois, parce que, comme lui, il

est presque uniquement composé de carbone. Nous ne pouvons cependant admettre cette identité, parce que le coke contient souvent de 15 à 18 pour cent de cendres, tandis que le charbon de bois n'en renferme que 7. Faute de donnée plus précise, nous supposerons que le coke produise l'effet de 0,85 de charbon pur, et nous admettrons désormais que 1 kilogramme de coke développe par sa combustion 6000 unités de chaleur. Suivant M. Bull, le pouvoir calorifique du coke n'est que les $\frac{4}{5}$ de celui du charbon de bois; mais il faut nécessairement que le coke qu'il a employé renfermât beaucoup plus de substances étrangères que celui qu'on emploie communément en France, ou que dans son appareil la combustion de cette matière ait été mal effectuée.

241. *Pouvoir rayonnant.* Je n'ai point fait d'expériences pour déterminer le pouvoir rayonnant du coke, mais je suis convaincu qu'il est plus considérable que celui du charbon de bois.

## § 9. — DÉTERMINATION DES VOLUMES D'AIR NÉCESSAIRES POUR BRULER LES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES, ET DES VOLUMES DE GAZ QUI S'ÉCHAPPENT.

242. La détermination des dimensions des cheminées destinées à produire un effet donné exigeant nécessairement la connaissance du volume d'air qu'elles doivent appeler par heure dans le foyer, il est indispensable de connaître le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kilog. des différents combustibles.

243. Les combustibles employés dans l'industrie étant tous formés de carbone et d'hydrogène, lorsqu'on connaîtra les volumes d'air nécessaires pour brûler 1 kilogramme de chacun d'eux, on trouvera facilement, d'après la composition des autres combustibles, les volumes d'air nécessaires à leur combustion.

244. L'acide carbonique étant formé de 27,36 de carbone et de 72,64 d'oxygène, il en résulte qu'un kilogramme de carbone exige $72,64 : 27,36 = 2^{k}65$ d'oxygène pour passer à l'état d'acide carbonique. La densité de l'oxygène par rapport à l'air étant 1,1026, et un mètre cube d'air à 0°, et sous la pression de 0,76, pesant $1^{k}3$, un mètre cube d'oxygène pèse $1,3 \times 1,1026 = 1^{k}43$; et par conséquent 1 kilogramme de carbone exige pour sa combustion $2,65 : 1,43 = 1^{m.c.},85$ d'oxygène. Or, comme

l'air renferme 0,21 d'oxygène, la combustion de 1 kilogramme de carbone exige $1^{m},85 \times 100 : 21 = 8^{m.c.},81$ d'air atmosphérique.

L'eau étant formée de 11,1 d'hydrogène et de 88,9 d'oxygène, 1 kilogramme d'hydrogène exige pour sa combustion $88,9 : 11,1 = 8$ kilogrammes d'oxygène ou $8 : 1,43 = 5^{m.c.},6$; ou $5,6 \times 100 : 21 = 26^{m.c.},66$ d'air.

D'après ces éléments, il est facile de calculer le volume d'air qu'exige la combustion de 1 kil. de chaque combustible.

245. Le bois parfaitement pur renfermant l'équivalent de 0,52 de carbone, le bois ordinaire complétement desséché et contenant 2 pour cent de cendres, renfermera $52 \times \frac{98}{100} = 51$ de carbone; et par conséquent le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de bois parfaitement sec sera

$$8,81 \times 0,51 = 4^{m.c.},50.$$

246. Quand le bois se trouve dans l'état ordinaire de dessiccation, il renferme 20 pour cent d'eau; et alors 1 kilogramme de bois ne contient que 0,80 de matières ligneuses, et le volume d'air nécessaire à sa combustion se réduit à

$$4,50 \times 0,8 = 3^{m.c.},60.$$

247. Quant au charbon de bois, si on le considère comme formé de 0,93 de carbone et de 0,07 de cendres, la quantité d'air qu'exigera sa combustion sera

$$8,81 \times 0,93 = 8^{m.c.},20.$$

248. La tannée peut être considérée comme du bois ordinaire, mais qui renfermerait au moins 3 pour cent de cendres de plus. Ainsi le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de tannée sera

$$3^{m.c.},60 \times 0,97 = 3^{m.c.},50.$$

249. Pour les tourbes de bonne qualité et complétement desséchées, qui se composent de 0,58 de carbone, de 0,30 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, de 0,2 d'hydrogène en excès et de 0,05 de cendres, le volume d'air nécessaire à la combustion de 1 kilogramme de ce combustible sera évidemment

$$0,58 \times 8,81 + 0,02 \times 26,66 = 5^{m.c.},64.$$

250. Pour les tourbes de bonne qualité qui n'ont été desséchées que

par une longue exposition à l'air sur les tourbières, et qui renferment encore 0,20 d'eau, la quantité d'air nécessaire à leur combustion sera

$$5{,}64 \times 0{,}80 = 4^{m.c.},51.$$

251. Quant au charbon de tourbe, qui renferme ordinairement 0,25 de cendres, on peut admettre approximativement que le volume d'air nécessaire pour en brûler un kil. est de

$$8{,}81 \times 0{,}75 = 6^{m.c.},60.$$

252. Le volume d'air nécessaire à la combustion des houilles ne peut pas être déterminé d'une manière précise, à cause de la variation de leur composition en carbone, oxygène, hydrogène et matières étrangères. Il faut alors faire le calcul pour une houille renfermant le plus d'hydrogène en excès, parce que l'hydrogène absorbe plus d'oxygène que le carbone. Nous choisirons une houille composée de 5 d'hydrogène en excès, 5 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau, et de 88 de carbone, ce qui suppose 2 de cendres.

La quantité d'air nécessaire sera alors

$$8{,}81 \times 0{,}88 + 26{,}66 \times 0{,}05 = 9^{m.c.},05.$$

253. Enfin, pour le coke renfermant 0,15 de cendres, le volume d'air nécessaire sera

$$8{,}81 \times 0{,}85 = 7^{m.c.},5.$$

254. Mais les quantités d'air qui traversent les foyers sont beaucoup plus grandes que celles qui seraient rigoureusement nécessaires pour brûler le combustible consommé, attendu que l'oxygène de l'air n'est jamais absorbé en totalité. On conçoit même que ces quantités pourraient varier dans des limites très-étendues. Cependant, dans les foyers bien disposés où l'épaisseur de la couche de combustible et le tirage sont convenables, la quantité d'oxygène qui s'échappe sans altération n'éprouve que de faibles variations. D'après un grand nombre d'analyses de l'air pris à l'issue des cheminées des chaudières à vapeur dont les foyers étaient alimentés régulièrement par la houille, j'ai reconnu que la quantité d'air qui échappe ordinairement à la combustion est à peu près égale à la moitié de la quantité totale. Dans les foyers alimentés par le bois, cette quantité est un peu plus petite. La plus faible proportion d'air qui

échappe à la combustion dans un foyer à bois, provient sans aucun doute de ce que la combustion de ce corps est toujours accompagnée de flamme, ce qui n'arrive pas pour la houille. Les foyers à coke ont donné les mêmes résultats que les foyers à houille, mais seulement quand les morceaux de coke n'étaient pas trop gros et que l'épaisseur de la couche de combustible était considérable; quand ces conditions ne sont pas remplies, la quantité relative d'oxygène absorbée est beaucoup plus petite. Je n'ai point eu l'occasion de faire des expériences sur la combustion de la tourbe ni sur celle du charbon de tourbe, mais il est probable que les résultats auraient peu différé de ceux qu'ont présentés la houille et le bois. Dans tous les cas, il est évident que la quantité d'air qui échappe à la combustion est encore beaucoup plus grande quand la porte du foyer est ouverte. Mais comme cette circonstance ne se reproduit que pendant des instants très-courts et à des intervalles assez éloignés, elle n'a pas d'influence sensible sur la quantité d'air moyenne qui traverse le foyer. Dans ce qui précède, il n'est pas question de nos foyers domestiques, car dans ceux-ci la quantité d'air qui s'échappe sans altération est beaucoup plus considérable encore, parce qu'une grande partie de l'air appelé dans la cheminée ne passe pas à travers le combustible.

255. La fumée d'une cheminée peut être recueillie de différentes manières: la plus simple consiste à remplir d'eau un flacon qu'on débouche après l'avoir renversé au sommet de la cheminée; l'eau est remplacée par la fumée. On peut aussi prendre un flacon plein d'eau qu'on met en communication par la partie supérieure avec l'intérieur de la cheminée au moyen d'un tube, et qu'on vide ensuite par un siphon dont la différence de hauteur des deux branches est suffisante. L'air brûlé étant recueilli, il faut déterminer la quantité d'oxygène libre et celle de l'acide carbonique par les procédés connus. La différence entre les $\frac{21}{100}$ et la somme des volumes de ces deux gaz représente la quantité d'oxygène qui a été employée à la combustion de l'hydrogène, ou à la production de l'oxyde de carbone, du moins quand la fumée ne contient pas de carbures d'hydrogène.

D'après des expériences nombreuses faites à Vesserling, dans l'usine de MM. Gros, Davillier, Roman et compagnie, en 1832, la quantité d'oxygène trouvée dans la fumée d'une cheminée de chaudière à vapeur a varié de 10,5

à 11,5 lorsqu'on brûlait de la houille, et de 4,55 à 7 lorsqu'on brûlait du bois. Pour le premier combustible, la quantité d'acide carbonique a varié de 7 à 5,5, et pour le bois de 13 à 9,5; d'où il suit que la quantité d'oxyde de carbone et de gaz combustibles a varié pour la houille entre 3,5 et 4; et pour le bois entre 3,45 et 4,5. Les grilles des foyers étaient très-petites.

256. En doublant le volume d'air rigoureusement nécessaire à la combustion, quand le combustible ne contient que du carbone, on obtient des volumes qui s'accordent avec ce fait, que l'air qui a servi à la combustion renferme encore 0,10 d'oxygène libre, parce que l'oxygène absorbé est représenté par un égal volume d'acide carbonique. Il en serait encore de même si le combustible renfermait de l'hydrogène, quoique le produit de la combustion de ce corps n'existât plus dans l'air analysé, pourvu toutefois que la quantité d'hydrogène fût très-petite, et c'est ce qui arrive pour tous les combustibles qu'on emploie ordinairement. L'erreur que l'on commet en n'ayant pas égard à l'hydrogène que renferme le combustible est sans importance, et peut être négligée, d'autant plus que la proportion 0,1 d'oxygène qui se trouve ordinairement dans la fumée des chaudières à vapeur, varie cependant dans des limites assez étendues.

257. Alors, en admettant que pour tous les combustibles, excepté pour le bois, la moitié de la quantité d'air qui traverse le foyer n'a point été altérée, et que pour le bois $\frac{1}{3}$ seulement de l'oxygène échappe à la combustion, on formera le tableau suivant des volumes d'air nécessaires à la combustion de $1^k$ des différents combustibles :

| | mèt. cubes. |
|---|---|
| Bois parfaitement desséché | 6,75 |
| Bois ordinaire à 0,20 d'eau | 5,40 |
| Charbon de bois | 16,40 |
| Tourbe parfaitement sèche | 11,28 |
| Tourbe à 0,20 d'eau | 9,02 |
| Charbon de tourbe | 13,20 |
| Houille moyenne | 18,10 |
| Coke à 0,15 de cendres | 15,00 |

Ces nombres représentent les volumes d'air qui doivent entrer dans le foyer pour chaque kilogramme de combustible à brûler.

258. Cherchons maintenant les volumes de gaz produits par la combustion d'un kilogramme de ces combustibles.

259. Si le combustible était formé de carbone pur, comme l'acide carbonique a un volume égal à celui de l'oxygène qui l'a formé, le volume d'air qui sortirait par la cheminée serait égal au volume d'air qui a pénétré dans le foyer, dilaté à la température de la cheminée; c'est ce qui a lieu pour le charbon de bois, de tourbe, le coke et l'anthracite.

Quand les combustibles renferment, outre le carbone, de l'eau toute formée ou de l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions nécessaires pour la produire, on ne peut plus regarder le volume de gaz qui se dégage comme égal au volume d'air appelé dilaté à la température de la cheminée, car il en diffère par le volume de vapeur produite. Il en est encore de même quand les combustibles contiennent un excès d'hydrogène, attendu que le volume de vapeur auquel il donne naissance est beaucoup plus grand que le volume d'oxygène qui a servi à sa formation : ces volumes sont à peu près dans le rapport de 2 à 1, et la différence est par conséquent égale au volume d'oxygène employé. Pour le bois et la tannée, l'excès d'hydrogène étant très-petit, on peut négliger l'accroissement de volume de l'air employé à sa combustion; mais, pour les tourbes et les houilles, il faut tenir compte des deux causes d'augmentation du volume d'air qui a traversé le foyer.

Comme 1 kilogramme d'eau produit $1^{m.c.},69$ de vapeur à 100° et sous la pression de 0,76 ou 1,69 : $(1+0,365) = 1^{m.c.},23$ de vapeur ramené fictivement à 0°, le volume de vapeur que fournira 1 kilogramme de bois sec sera à peu près $0,48 \times 1,23 = 0^{m.c.},59$; celui que donnera 1 kilogramme de bois ordinaire sera $(0,20 + 0,48 \times 0,80)\ 1,23 = 0^{m.c.},71$. Pour la tannée, le nombre sera sensiblement le même.

1 kilogramme d'hygrogène exige 8 kilogrammes d'oxygène pour former de l'eau; 1 kilogramme d'oxygène à 0° et sous la pression de 0,76 occupe un volume de $0^{m.c.},70$. Par conséquent, pour la tourbe complétement desséchée et contenant un excès de 0,02 d'hydrogène, l'augmentation de volume due à la vapeur produite sera $0,30 \times 1,23 + 0,02 \times 8 \times 0,7 = 0,37 + 0,11 = 0^{m.c.},48$. Pour la tourbe à 20 pour cent d'eau, ce sera $(0,20 \times 1,23 + 0,80 \times 0,48 = 0^{m.c.},63$. Enfin, pour la houille contenant un excès de 0,05 d'hydrogène (252), on trouvera $0,05 \times 1,23 + 0,05 \times 8 \times 0,7 = 0,06 + 0,28 = 0^{m.c.},34$.

260. D'après ce que nous venons de dire, en désignant par $t$ la température des gaz à la partie supérieure de la cheminée, par $a$ le coefficient de dilatation des gaz 0,00365, les volumes de gaz qui se dégageront pour chaque kilogramme de combustible seront :

| | |
|---|---|
| Pour le bois parfaitement desséché. | $(6{,}75+0{,}59)(1+at)=7{,}34(1+at)$ |
| Pour le bois ordinaire..... | $(5{,}40+0{,}71)(1+at)=6{,}11(1+at)$ |
| Pour le charbon de bois..... | $16{,}40(1+at)$ |
| Pour la tourbe desséchée..... | $(11{,}25+0{,}48)(1+at)=11{,}73(1+at)$ |
| Pour la tourbe ordinaire..... | $(9{,}02+0{,}63)(1+at)=9{,}65(1+at)$ |
| Pour le charbon de tourbe..... | $13{,}20(1+at)$ |
| Pour la houille moyenne..... | $(18{,}10+0{,}34)(1+at)=18{,}44(1+at)$ |
| Pour le coke à 0,15 de cendres ..... | $15{,}00(1+at)$ |

261. Le nombre relatif à la houille suppose que ce combustible ne laisse que 2 à 3 pour cent de résidu ; mais les cendres qu'on obtient dans les grands foyers, excèdent de beaucoup celles que donnent les expériences de laboratoire, parce que ces résidus renferment beaucoup de coke menu. Comme on obtient ordinairement de 10 à 20 pour cent de résidu, on pourrait n'admettre que $16(1+at)$ pour une houille moyenne. Les nombres 6 pour le bois, et 16 pour la houille, s'accordent avec des expériences faites à Vesserling, sur une même chaudière successivement alimentée par du bois et de la houille qui a donné de 14 à 20 pour cent de cendres, en moyenne 16 ; car dans une heure on a brûlé $140^k$ de houille ou $375^k$ de bois ; par conséquent il est sorti de la cheminée des volumes de gaz et de vapeurs qui, ramenés à 0, étaient $140 \times 16 = 2240^{m.c.}$, et $375 \times 6 = 2250^{m.c.}$, nombres sensiblement égaux.

## § 10. — COMPARAISON DES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES.

262. En récapitulant ce que nous avons dit dans les différents paragraphes de ce chapitre, nous formerons le tableau suivant, qui renferme les puissances calorifiques et les pouvoirs rayonnants des différents combustibles, ainsi que les volumes d'air nécessaires à leur combustion et ceux qui se dégagent par les cheminées.

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | PUISSANCES CALORIFIQUES. | POUVOIRS RAYONNANTS. | VOLUMES D'AIR froid nécessaires pour brûler 1 kil. de combustible. | VOLUMES DE GAZ qui se dégagent pour 1 kil. de combustible. |
|---|---|---|---|---|
| Bois sec..... | 3600 | 0,28 | 6,75 | 7,34 $(1 + at)$ |
| Bois ordinaire à 0,20 d'eau. | 2800 | 0,25 | 5,40 | 6,11 $(1 + at)$ |
| Charbon de bois..... | 7000 | 0,50 | 16,40 | 16,40 $(1 + at)$ |
| Tourbe sèche..... | 4800 | 0,25 | 11,28 | 11,73 $(1 + at)$ |
| Tourbe à 0,20 d'eau.... | 3600 | 0,25 | 9,02 | 9,65 $(1 + at)$ |
| Charbon de tourbe..... | 5800 | 0,50 | 13,20 | 13,20 $(1 + at)$ |
| Houille moyenne..... | 7500 | Plus que le charbon de bois. | 18,10 | 18,44 $(1 + at)$ |
| Coke à 0,15 de cendres.. | 6000 | Plus que le charbon de bois. | 15,00 | 15,00 $(1 + at)$ |

D'après ce tableau, lorsqu'on connaîtra les prix des différents combustibles dans une même localité, ainsi que les poids des différentes mesures quand les combustibles ne sont pas vendus au poids, on trouvera facilement leurs valeurs relatives.

263. A Paris, par exemple, où la houille vaut ordinairement 4,50 l'hectolitre ras, le coke 2,25 l'hectolitre comble, le bois 35 francs la voie de 2 stères, et l'hectolitre de charbon de bois 4 francs,

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par la houille est de :

$$4.50.\frac{1000}{7500.84} = \frac{0,45}{63} = 0,0072.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le coke est de :

$$2.25.\frac{1000}{6000.35} = \frac{0,22}{21} = 0,0097.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le bois est de :

$$35.\frac{1000}{2800.750} = \frac{0,35}{21} = 0,017.$$

Le prix de 1000 unités de chaleur produites par le charbon de bois est de :

$$4.\frac{1000}{7000.22} = 0,026.$$

Ainsi, à Paris, le chauffage par la houille est le plus économique de tous; le chauffage par le coke est moins cher que le chauffage au bois; et le chauffage par le charbon de bois est le plus cher de tous.

*Tableau des valeurs relatives de différents combustibles, estimés en volumes sous le rapport de la quantité de chaleur qu'ils produisent dans leur combustion.*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | hectolitre de houille moyenne | | | 630 |
| 1 | corde de bois (4 mètres cubes) | de noyer | d'une année de coupe | 7742 |
| 1 | *idem* | de chêne blanc | *idem* | 6846 |
| 1 | *idem* | de frêne | *idem* | 5974 |
| 1 | *idem* | de hêtre | *idem* | 5603 |
| 1 | *idem* | d'orme | *idem* | 4487 |
| 1 | *idem* | de bouleau | *idem* | 4102 |
| 1 | *idem* | de châtaignier | *idem* | 4035 |
| 1 | *idem* | de charme | *idem* | 5572 |
| 1 | *idem* | de pin | *idem* | 4263 |
| 1 | *idem* | de peuplier d'Italie | *idem* | 3069 |
| 1 | hectolitre de charbon | de noyer | | 292 |
| 1 | *idem* | de chêne | | 255 |
| 1 | *idem* | de frêne | | 219 |
| 1 | *idem* | de hêtre | | 176 |
| 1 | *idem* | d'orme | | 167 |
| 1 | *idem* | de bouleau | | 153 |
| 1 | *idem* | de châtaignier | | 146 |
| 1 | *idem* | de charme | | 176 |
| 1 | *idem* | de pin | | 160 |
| 1 | *idem* | de peuplier d'Italie | | 109 |
| 1 | hectolitre comble de coke | | | 230 |
| 1 | corde de tourbe de Beauvais, deuxième qualité (177) 2000$^k$ | | | 7200 |

Ces nombres ont été obtenus en multipliant le nombre de kilog. de matière contenue dans la mesure par le nombre d'unités de chaleur que développe en brûlant un kilog. de combustible, et supprimant les trois derniers chiffres.

Nous remarquerons cependant, que les nombres du tableau précédent qui représentent les valeurs relatives des différents combustibles, sous les volumes ordinairement employés dans le commerce, ne peuvent être considérés que comme des approximations assez grossières, car le poids d'un même volume de combustible éprouve de grandes variations suivant son état hygrométrique, la grosseur des morceaux, et la manière de mesurer. Il faudra toujours, dans chaque localité, déterminer directement le poids moyen de la mesure, et ramener les prix aux poids.

264. *Choix du combustible.* Le choix du combustible dépend, 1° de la

nature de l'effet qu'on veut produire; 2° du prix du combustible comparé à la quantité de chaleur qu'il développe.

Quand on doit produire une température très-élevée dans une étendue considérable, et à une grande distance du foyer, le bois est le combustible le plus avantageux, parce qu'il donne beaucoup de flamme; et, de tous, ceux qui paraissent préférables sont les bois légers qui laissent peu de braise.

Quand, au contraire, la température, quoique très-élevée, doit être produite à une petite distance du foyer, le bois et la houille peuvent également être employés; et même, dans certains cas, la tourbe présente de grands avantages, du moins dans les localités voisines des tourbières. C'est ce qui a lieu, d'après les expériences de M. Garnier, pour les chaudières à vapeur. Outre l'avantage de l'économie de prix, ce combustible a sur la houille plusieurs autres avantages importants : 1° les feux sont plus faciles à diriger, parce qu'il ne se forme point, sur les grilles, de scories qui obstruent le passage de l'air; 2° la température étant moins élevée, les grilles, les parois du fourneau, les tubes bouilleurs et les chaudières, résistent plus longtemps. Nous devons cependant ajouter que M. Garnier a observé qu'il fallait d'abord chauffer le fourneau pendant une heure avec la houille, avant de l'alimenter avec de la tourbe.

Dans le choix de la houille, il faut préférer celles qui sont seulement assez collantes, pour que le menu ne passe pas à travers la grille, comme le flenu de Mons, car celles qui sont trop collantes interceptent rapidement le courant d'air, brûlent les grilles et exigent trop de soin de la part du chauffeur. On obtiendrait certainement de très-bons résultats par le mélange des houilles sèches et des houilles grasses dans des proportions convenables.

Mais si la température doit être très-élevée et seulement dans le foyer, comme pour la fusion des métaux, la houille, le coke et le charbon de bois doivent être préférés; le bois et la tourbe ne pourraient pas être employés, du moins avec le même avantage.

Si la chaleur ne doit pas être très-forte, et ne doit être portée qu'à une petite distance du foyer, tous les combustibles peuvent être employés, mais d'une manière plus ou moins avantageuse.

La tourbe me paraît surtout devoir être préférée quand il s'agit de produire une température peu élevée et longtemps prolongée, comme

pour le chauffage des étuves, des séchoirs, etc. On peut cependant l'employer aussi, comme nous l'avons déjà dit, pour la production de la vapeur et les distillations. Dans tous les cas il serait très-utile de dessécher complétement la tourbe par la chaleur perdue des fourneaux.

Quand différents combustibles peuvent être également employés, le choix ne dépend plus que de la comparaison des prix des masses qui ont le même pouvoir calorifique. Il est évident que si la chaleur rayonnante seule devait être utilisée, il faudrait avoir égard à la fois, et à la puissance calorifique, et au pouvoir rayonnant.

265. Examinons maintenant les autres combustibles simples ou composés, qui, à cause de leurs prix élevés, ne sont pas généralement employés dans l'industrie. Le tableau suivant renferme les puissances calorifiques d'un certain nombre de ces corps, déterminées par différents physiciens :

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | PUISSANCES CALORIFIQUES déduites de l'expérience et exprimées en unités de chaleur pour 1 kil. | |
|---|---|---|
| Carbone pur | M. Despretz | 7800 |
| Hydrogène pur | Laplace | 23400 |
| | Clément | 22115 |
| | M. Dezpretz | 23640 |
| Hydrogène proto-carboné | Dalton | 6375 |
| Hydrogène bi-carboné | Dalton | 6600 |
| Oxyde de carbone | Dalton | 1857 |
| Huile d'olive | Rumfort | 9044 |
| | Lavoisier | 11196 |
| Huile de colza épurée | Rumfort | 9307 |
| Éther sulfurique $d = 0{,}728$ à 20° | Rumfort | 8030 |
| Alcool à 42° à 15°,5 de température | Rumfort | 6195 |
| Alcool à 35° à 15,5 de température | Rumfort | 5261 |
| Suif | Rumfort | 8639 |
| | Laplace | 7186 |
| Cire blanche | Rumfort | 9679 |
| | Laplace | 10500 |
| Naphte $d = 0{,}827$ | Rumfort | 7338 |
| Phosphore | Laplace | 7500 |
| Essence de térébenthine | Dalton | 4500 |

266. M. Velter a émis le premier l'hypothèse que les quantités de chaleur produites par les différents combustibles simples ou composés étaient proportionnelles aux quantités d'oxygène absorbées. Cette hypothèse fut appuyée par les expériences de M. Despretz sur le carbone et l'hydrogène, d'après lesquelles les quantités de chaleur produites sont sensiblement dans le rapport de 1 à 3, qui est aussi celui des poids d'oxygène absorbé par les mêmes poids de ces combustibles. Cette loi était cependant peu probable, car la quantité totale de chaleur développée doit certainement dépendre de l'état et de la capacité calorifique des corps produits par la combustion, et on devait présumer que les corps qui, par leur combustion, produisent des corps solides, dégageraient plus de chaleur que ceux dont la combustion ne donne naissance qu'à des gaz.

Cette hypothèse a cependant été admise par les chimistes, et M. Berthier a imaginé une méthode très-facile et très-expéditive fondée sur ce principe, pour déterminer les puissances calorifiques des combustibles formés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, et qui est applicable aux bois dans les différents états de dessiccation et de carbonisation, aux tourbes et aux combustibles fossiles. Cette méthode consiste à évaluer la quantité de plomb produite en calcinant ces matières avec un excès de litharge. Voici la marche de l'opération : on prend un gramme de combustible réduit en particules aussi ténues que possible ; si c'est du charbon, de la houille ou du coke, on le porphyrise pour l'amener à l'état de poudre impalpable ; si c'est du bois, on se procure de la sciure très-menue au moyen d'une scie extrêmement mince, ou bien en le râpant avec une lime à grains serrés. On mêle la poudre avec une quantité de litharge plus grande que celle qu'elle peut réduire, 20 grammes au moins, 40 grammes au plus : on connaît toujours cette quantité approximativement d'après la nature et l'aspect du combustible. On introduit le mélange avec soin au fond d'un creuset de terre, et l'on met par-dessus 20 à 30 grammes de litharge pure. Ce creuset doit être à moitié rempli tout au plus ; on le place sur un fromage, dans un fourneau de calcination déjà échauffé et rempli de charbon bien allumé ; on met dessus un couvercle, et on chauffe graduellement. Il y a ramollissement, bouillonnement et quelquefois boursouflement. Lorsque la fusion est complète, on couvre le creuset de charbon, et on donne

un coup de feu, que l'on maintient pendant un temps suffisant pour que l'excès de litharge forme un verre en dissolvant une portion de la silice du creuset, mais en ayant soin cependant de ne pas le prolonger assez pour que celui-ci risque d'être percé. Le creuset étant refroidi, on le casse, et le culot de plomb s'en sépare au premier choc; il n'adhère pas non plus à la scorie, parce qu'elle est silicatée, tandis que la litharge pure, non-seulement y adhérerait, mais encore y pénétrerait en certaine quantité et en augmenterait le poids notablement (*Annales de chimie et de physique,* tome 59). Le carbone pur réduisant un poids de litharge correspondant à 34 fois son poids de plomb, en divisant le poids du culot de plomb par 0,34, son poids étant estimé en grammes, on aura l'équivalent du combustible en carbone.

267. Mais les expériences de Dulong renversent complétement l'hypothèse sur laquelle cette méthode est fondée, savoir, que les quantités de chaleur développées par les combustibles sont proportionnelles aux quantités d'oxygène absorbées; car il résulte de ces expériences que, pour le même poids de carbone et d'hydrogène, les quantités de chaleur produites sont dans le rapport de 7170 à 34742, ou de 1 à 4,84. Quoique l'on ne connaisse pas les détails des expériences de Dulong, l'exactitude que ce célèbre physicien a apportée dans tous ses travaux, ne permet pas de douter que dans ceux dont il est question il n'ait mis tous les soins désirables.

268. *Résultats des expériences de Dulong.* Le compte rendu des séances de l'Académie des sciences, tome 7, renferme un extrait des registres de Dulong, où se trouvent les résultats des expériences qu'il a faites sur les quantités de chaleur développées par la combustion d'un grand nombre de corps. Nous rapporterons tous ces résultats en prenant seulement la moyenne de ceux qui ont été obtenus pour le même corps. Dulong avait pris pour unité de chaleur celle qui est nécessaire pour échauffer 1 gramme d'eau de 1°; nous ramènerons les nombres de Dulong à l'unité que nous avons toujours employée jusqu'ici (56).

*Hydrogène.*

| | Moyenne. |
|---|---|
| 1 litre d'hydrogène à 0° et à 0,76, donne en brûlant (3,07 à 3,12)..... | 3,106 |
| 1 litre d'oxygène dans sa combustion avec la quantité convenable d'hydrogène | 6,172 |

*Gaz des marais.*

| | Moyenne. |
|---|---|
| 1 litre de gaz des marais (9,948 à 9,317) | 9,587 |
| 1 litre d'oxygène | 4,793 |

*Oxyde de carbone.*

| | |
|---|---|
| 1 litre d'oxyde de carbone (3,069 à 3,202) | 3,130 |

*Gaz oléfiant.*

| | |
|---|---|
| 1 litre de gaz oléfiant (15,05 à 15,57) | 15,33 |

*Alcool absolu.*

| | |
|---|---|
| 1 litre de vapeur d'alcool (14,310 à 14,441) | 14,44 |

*Charbon.*

| | |
|---|---|
| 1 litre de vapeur de charbon (8,009 à 7,540) | 7,858 |

*Essence de térébenthine.*

| | |
|---|---|
| 1 litre de vapeur | 70,607 |
| 1 gramme | 10,836 |

*Huile d'olive.*

| | |
|---|---|
| 1 gramme | 9,862 |

*Éther sulfurique.*

| | |
|---|---|
| 1 litre (32,733 à 33,968) | 33,353 |
| 1 gramme (9,257 à 9,604) | 9,430 |

*Cyanogène.*

| | |
|---|---|
| 1 litre (12,080 à 12,602) | 12,270 |

*Hydrogène et oxyde d'azote.*

| | |
|---|---|
| 1 litre d'hydrogène | 5,220 |

*Oxyde de carbone et oxyde d'azote.*

| | |
|---|---|
| 1 litre d'oxyde de carbone | 5,549 |

Dans ces deux expériences il se produit de l'acide nitreux en quantité sensible.

*Soufre dans l'oxygène.*

| | |
|---|---|
| 1 gramme de soufre (2,452 à 2719) | 2,601 |

Il se produit de l'acide sulfurique anhydre.

*Fer.*

| | |
|---|---|
| 1 litre d'oxygène (6,152 à 6,281) | 6,216 |

*Étain.*

| | |
|---|---|
| 1 litre d'oxygène (6,325 à 6,790) | 6,557 |

*Protoxyde d'étain.*

Moyenne.

1 litre d'oxygène (6,343 à 6,611)..... 6,477

Dulong pensait que dans ces expériences il s'est formé une combinaison entre le protoxyde et le deutoxyde.

Une troisième expérience a donné..... 6,262

*Cuivre.*

1 litre d'oxygène (3,742 à 3,503)..... 3,720

*Protoxyde de cuivre.*

1 litre d'oxygène..... 3,130

*Antimoine.*

1 litre d'oxygène (5,259 à 5,875)..... 5,484

La quantité d'oxygène absorbée correspond exactement à l'acide antimonieux.

*Zinc.*

1 litre d'oxygène (7,378 à 7,753)..... 7,577

*Cobalt.*

1 litre d'oxygène..... 5,721

*Nickel.*

1 litre d'oxygène..... 5,333

269. D'après quelques lignes écrites sur une feuille volante, Dulong paraît avoir soupçonné l'existence d'un rapport simple entre les chaleurs spécifiques et les quantités de chaleurs dégagées par l'absorption d'une même quantité d'oxygène dans la combustion. Les nombres renfermés dans le tableau précédent paraissent favorables à cette idée.

Il résulte d'abord de ces expériences, que la quantité de chaleur développée par 1 litre d'oxygène n'est pas constante, car

| | |
|---|---|
| Avec l'hydrogène elle est de..... | 6,172 |
| Avec le gaz des marais de..... | 4,793 |
| Avec le carbone de..... | 3,929 |
| Avec le fer de..... | 6,216 |
| Avec le cuivre de..... | 3,720 |
| Avec le cobalt de..... | 5,721 |

C'est d'ailleurs ce qui est exprimé dans la note qui termine les observations de Dulong.

270. Déduisons maintenant de ces différents résultats les puissances calorifiques des corps combustibles généralement employés.

Le poids de 1 litre d'hydrogène..... $=0{,}0688 \times 1{,}2991 = 0{,}0894$
Le poids de 1 litre de vapeur de carbone..... $=0{,}4219 \times 1{,}2991 = 0{,}543$
Mais M. Dulong a admis un poids double..... ..... $1{,}096$
Le poids de 1 litre d'oxyde de carbone..... $=0{,}96783 \times 1{,}2991 = 1{,}258$
Le poids de 1 litre d'hydrogène proto-carboné... $=0{,}5595 \times 1{,}2991 = 0{,}7267$
Le poids de 1 litre d'hydrogène bi-carboné..... $=0{,}9814 \times 1{,}2991 = 1{,}274$
Le poids de 1 litre de vapeur d'alcool..... $=1{,}613 \times 1{,}2991 = 2{,}0969$

On trouve, d'après cela, pour l'hydrogène,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $3070 : 0{,}0894 = 34340$ |
| | $3120 : 0{,}0894 = 34900$ |
| Valeur moyenne de toutes les expériences. | $3106 : 0{,}0894 = 34742$ |

pour le carbone,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $8009 : 1{,}096 = 7307$ |
| | $7540 : 1{,}096 = 6880$ |
| Valeur moyenne de toutes les expériences. | $7858 : 1{,}096 = 7170$ |

pour l'oxyde de carbone,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $3069 : 1{,}258 = 2439$ |
| | $3202 : 1{,}258 = 2545$ |
| Valeur moyenne de toutes les expériences. | $3130 : 1{,}258 = 2488$ |

pour l'hydrogène proto-carboné,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $9{,}948 : 0{,}7267 = 13702$ |
| | $9{,}317 : 0{,}7267 = 12833$ |
| Valeur moyenne de toutes les expériences. | $9{,}587 : 0{,}7267 = 13205$ |

pour l'hydrogène bi-carboné,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $15050 : 1{,}274 = 11813$ |
| | $15570 : 1{,}274 = 12221$ |
| Valeur moyenne de toutes les expériences. | $15330 : 1{,}274 = 12032$ |

pour l'alcool,

| | |
|---|---|
| Valeurs extrêmes..... | $14310 : 2{,}097 = 6824$ |
| | $14441 : 2{,}097 = 6886$ |
| Valeur moyenne..... ..... | 6855 |

271. Il résulte de la puissance calorifique du carbone et de celle de l'oxyde de carbone, que, quand un kilogramme de carbone passe d'abord à l'état d'oxyde de carbone et ensuite à l'état d'acide carbonique, quoique la quantité d'oxygène absorbé soit la même, il se dégage beaucoup plus de chaleur dans la seconde partie de la combustion que dans la première. En effet, l'oxyde de carbone étant formé de 0,43 de carbone et de 0,57 d'oxygène, 1 kilogramme de carbone produit $1:0{,}43 = 2{,}325$ d'oxyde de carbone qui, par leur combustion, développent $2{,}325 \times 2488 = 5784$ unités de chaleur, et par conséquent le carbone, en se transformant en oxyde, développe seulement $7170 - 5784 = 1386$ unités.

272. Vérifions si, comme nous l'avons déjà supposé, la quantité de chaleur produite par un composé est égale à la somme des quantités de chaleur qui seraient produites par chacun de ses éléments.

En partant de cette supposition, on trouve :

pour l'hydrogène proto-carboné,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}7517 \times 7170 = 5389 \\ 0{,}2483 \times 34742 = 8626 \end{array}\right\} \; 14015$$

pour l'hydrogène bi-carboné,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}858 \times 7170 = 6151 \\ 0{,}142 \times 34742 = 4933 \end{array}\right\} \; 11084$$

pour l'essence de térébenthine, formée de 88 kilogrammes de carbone et de 11,6 d'hydrogène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}884 \times 7170 = 6352 \\ 0{,}116 \times 34742 = 4030 \end{array}\right\} \; 10382$$

pour l'alcool formé de 51,98 de carbone, 13,70 d'hydrogène et 34,32 d'oxygène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}5198 \times 7170 = 3726 \\ 0{,}941 \times 34742 = 3279 \end{array}\right\} \; 7005$$

pour l'éther sulfurique composé de 65,31 de carbone, 13,33 d'hydrogène et 21,36 d'oxygène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}6531 \times 7170 = 4682 \\ 0{,}1066 \times 34742 = 3703 \end{array}\right\} \; 8385$$

pour l'huile d'olive composée de 77,21 de carbone, 13,36 d'hydrogène et 9,43 d'oxygène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}7721 \times 7170 = 5535 \\ 0{,}1218 \times 34742 = 4231 \end{array}\right\} 9766$$

pour le suif formé de 79 de carbone, 9,3 d'oxygène et 11,7 d'hydrogène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}79 \times 7170 = 5664 \\ 0{,}106 \times 34742 = 3474 \end{array}\right\} 9138$$

pour la cire composée de 81,6 de carbone, de 13,9 d'hydrogène et de 4,5 d'oxygène,

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}816 \times 7170 = 5850 \\ 0{,}1285 \times 34742 = 4464 \end{array}\right\} 10314$$

Les nombres trouvés par Dulong pour les premiers corps, sont

| hyd. proto-carb. | hyd. bi-carb. | essence | alcool | éther | huile |
|---|---|---|---|---|---|
| 13205 | 12032 | 10836 | 6855 | 9430 | 9862 |

Ceux qu'on obtient en prenant la somme des effets produits par les éléments, sont pour les mêmes corps

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 14015 | 11084 | 10382 | 7005 | 8385 | 9766 |

Ces derniers nombres sont assez rapprochés des résultats de l'expérience pour justifier le principe d'après lequel ils ont été calculés.

273. D'après tout ce qui précède, nous admettrons, pour les puissances calorifiques des corps dont il a été question, les nombres suivants :

| | |
|---|---|
| Hydrogène | 34742 |
| Carbone passant à l'état d'oxyde | 1386 |
| Pour le poids de l'oxyde de carbone renfermant 1$^{k}$ de carbone. | 5784 |
| Pour le carbone passant à l'état d'acide carbonique | 7170 |
| Oxyde de carbone | 2488 |
| Hydrogène proto-carboné | 13205 |
| Hydrogène bi-carboné | 12032 |
| Soufre | 2601 |
| Éther sulfurique | 9430 |
| Essence de térébenthine | 10836 |
| Huile d'olive | 9862 |
| Alcool | 6855 |

274. Nous admettrons, en outre, 1° que la quantité de chaleur développée par un combustible composé est égale à la somme des quantités

de chaleur produites par ses éléments, en diminuant toutefois la quantité d'hydrogène de celle qui est absorbée par l'oxygène du combustible; 2° que la quantité de chaleur développée est la même quand la combustion a lieu immédiatement ou successivement; 3° que la quantité de chaleur développée est indépendante de la température du corps combustible et de celle de l'air; 4° et enfin, que cette quantité est indépendante de la pression du gaz comburant et de la proportion d'oxygène qu'il renferme. La première loi nous paraît suffisamment démontrée par la comparaison des résultats obtenus par Dulong et de ceux que donne le calcul. La seconde a été démontrée par M. Hess, du moins pour la chaleur dégagée par la combinaison de l'eau avec l'acide sulfurique et la chaux, et tout porte à croire qu'elle se vérifierait dans les autres combinaisons. La troisième, suivant M. Hess, paraît avoir été vérifiée par Dulong. Enfin, la dernière résulte de ce que M. Despretz a trouvé la même puissance calorifique pour le carbone brûlé dans l'air et dans l'oxygène pur.

275. Nous devons dire cependant qu'il reste encore beaucoup à faire relativement aux quantités de chaleur développées par la combustion, et en général par les actions chimiques : cette partie de la science n'est encore qu'ébauchée. Mais, pour l'objet qui nous occupe, nous pensons que les nombres connus présentent une approximation suffisante, et que si les lois énoncées ne sont pas rigoureusement exactes, elles s'approchent assez de la vérité pour ne pas conduire à de graves erreurs dans les applications industrielles.

276. *Observations sur le pouvoir rayonnant des combustibles.* Il résulte des expériences faites sur le bois et le charbon de bois, que le pouvoir rayonnant est plus petit pour les combustibles qui brûlent avec flamme que pour ceux qui brûlent sans flamme; cette conséquence est appuyée par les résultats qu'on obtient pour les huiles brûlées dans les becs d'éclairage; on trouve que leur pouvoir rayonnant est beaucoup plus petit que ceux des combustibles qui brûlent, au moins en partie, à l'état solide. Pour l'huile de colza, le pouvoir rayonnant est seulement de 0,18.

277. Les expériences sur les huiles ont été faites au moyen de l'appareil figure 2, planche 1re. Voici les données et les résultats d'une expérience faite sur l'huile de colza épurée.

La température de l'air était de 26°; l'eau introduite était à 23°,5. Par la combustion de 50 grammes d'huile, la température de l'eau a été élevée à 29°.

Par conséquent, la quantité de chaleur rayonnante absorbée était égale (133) à $(11^k,29 + 2^k223 \times 0,11)\ 5°,5 = 63$ unités; et la quantité de chaleur rayonnante était égale (108) à $63 \times 1,36 = 85,68$. Or, les 50 grammes d'huile qui ont été brûlés ont produit $50 \times 9307 : 1000 = 465,3$ unités (265); par conséquent la chaleur rayonnée est à la chaleur produite comme $85,68 : 465,3 :: 1 : 5,42$.

278. Après avoir étudié les différentes propriétés des combustibles, nous allons examiner les lois des mouvements de l'air. La connaissance de ces lois est indispensable pour la disposition des appareils de chauffage et de ventilation; car dans tous, quel que soit le but qu'on se propose, on a toujours de l'air à mettre en mouvement. Les mouvements de l'air sont produits tantôt par la force ascensionnelle de l'air chaud, tantôt par des machines mues par différents moteurs. Nous nous occuperons successivement des mouvements de l'air produits par la pression, des mouvements de l'air produits par la chaleur, et de ceux qui résultent des actions mécaniques.

# CHAPITRE III.

## ÉCOULEMENT DES GAZ COMPRIMÉS.

279. Nous examinerons successivement le cas où l'écoulement a lieu par des orifices percés dans les surfaces des réservoirs, et celui où les gaz s'écoulent par des tuyaux de conduite. Nous décrirons ensuite le meilleur moyen qu'on puisse employer pour mesurer la vitesse des gaz en mouvement.

### § 1. — VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ COMPRIMÉ, QUI S'ÉCOULE PAR UN ORIFICE PERCÉ EN MINCE PAROI OU PAR UN COURT AJUTAGE.

280. Lorsqu'un gaz comprimé s'échappe par une ouverture quelconque, percée en mince paroi, la vitesse d'écoulement dépend de la différence des pressions intérieure et extérieure et de la densité du gaz qui s'écoule. On peut calculer la vitesse d'écoulement en considérant le gaz comme un liquide de même densité, qui serait soumis à une pression égale à celle qui résulte de sa force élastique, diminuée de celle du milieu ambiant. Alors, pour avoir la vitesse, il faut trouver la hauteur d'une colonne liquide de même densité que le gaz, d'une section égale à celle de l'orifice, et dont le poids ferait équilibre à la pression qui produit l'écoulement : la vitesse d'écoulement cherchée est alors égale à celle qu'acquerrait un corps en tombant de cette hauteur. Cherchons, par exemple, avec quelle vitesse de l'air à 0°, sous la pression ordinaire, s'échapperait dans un espace vide. La pression, étant de $0^m,76$, sera de $10^m,33$ estimée en eau; et comme la densité de l'air est 0,0013 de celle de l'eau, il s'ensuit qu'une colonne d'air équivalente en poids

à $0^m,76$ de mercure aurait $\frac{10^m,33}{0,0013}$ de hauteur ou $7946^m$. Or, un corps en tombant de cette hauteur, acquerrait une vitesse de $394^m,81$ par seconde. Ce serait donc là la vitesse avec laquelle l'air, sous la pression ordinaire, s'écoulerait dans le vide.

281. Il résulte de ce qui précède plusieurs conséquences importantes : 1° A la même température, et quelle que soit la pression, un même gaz s'écoule dans le vide avec la même vitesse. En effet, les densités d'un même gaz à la même température sont proportionnelles aux pressions; les hauteurs des colonnes fluides dont les poids sont équivalents aux pressions sont aussi proportionnelles aux pressions, et ces mêmes hauteurs sont en raison inverse des densités; d'où il suit que, quelle que soit la force élastique d'un même gaz, la vitesse d'écoulement dans le vide sera constante à la même température. Ainsi, en renfermant de l'air dans un ballon, et le comprimant à 1, 2, 3, 1000 atmosphères, et le laissant s'échapper par un petit orifice dans un espace vide, la vitesse, pendant toute la durée de l'écoulement, sera la même. Mais la quantité de gaz qui s'échappera dans le même temps ne sera point constante : elle sera évidemment proportionnelle à la densité du gaz, et par conséquent à la pression. Cette permanence de la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé quand il s'échappe dans le vide n'existe plus quand l'écoulement a lieu dans un gaz, parce qu'alors la hauteur de la colonne génératrice de la vitesse est proportionnelle à la différence de force élastique de l'air intérieur et de l'air extérieur, et en raison inverse de la densité, et que la densité du gaz est proportionnelle à la pression totale que le gaz éprouve.

2° Les vitesses d'écoulement des gaz dans le vide sont en raison inverse des racines carrées des densités, car les hauteurs génératrices des vitesses sont en raison inverse des densités, et les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées de ces hauteurs. Il en est encore de même quand les gaz ont la même force élastique, et s'écoulent dans le même milieu; mais quand la différence des pressions du gaz et du milieu extérieur sont seulement les mêmes, les vitesses sont en outre en raison inverse des racines carrées des forces élastiques des gaz, comme on peut le voir dans l'article suivant.

282. Représentons par $v$ la vitesse, et par $h$ la hauteur d'une colonne

liquide de même densité que le gaz, et dont le poids serait équivalent à la pression qui produit le mouvement : nous aurons $v = \sqrt{2gh}$.

Pour déterminer $h$ en fonction de la densité, de la pression et de la température, désignons par $p$ et $p'$ les forces élastiques de l'air extérieur et du gaz comprimé estimées en mercure; par $d$ la densité du gaz à 0° sous la pression de $0^m,76$, et par $d'$ sa densité sous la pression $p'$ et à la température $t$.

La pression qui produit le mouvement est $p' - p$; pour estimer cette pression en eau, il faut la multiplier par la densité du mercure 13,59, et, pour l'obtenir en air atmosphérique à 0°, et sous la pression $0^m,76$, il faut encore diviser ce produit par la densité de l'air rapportée à l'eau, c'est-à-dire par 0,0013; ainsi la pression estimée en air sera $\frac{(p'-p)13,59}{0,0013}$. Mais il faut que cette pression soit estimée en gaz dont la densité est $d'$; la hauteur de la colonne sera alors $\frac{(p'-p).13,59}{0,0013}.\frac{1}{d'}$. Mais la densité d'un même gaz est proportionnelle à la pression quand la température est la même, et quand elle change, la pression restant la même, la densité varie en raison inverse du volume. Or, nous avons vu (36) que tous les gaz se dilatent également, et de 0,00365 de leur volume à zéro, pour chaque degré du thermomètre; nous aurons donc

$$d' = d\frac{p'}{0^m,76}\left(\frac{1}{1+t(0,00365)}\right).$$

D'après cela

$$h = \frac{13,59\times 0^m,76}{0,0013}\frac{(p'-p)}{p'd}[1+t(0,00365)].$$

Alors on aura

$$v = \sqrt{\frac{13,59\times 0^m,76}{0,0013}2g\frac{(p'-p)}{p'd}[1+t(0,00365)]}.$$

Substituant pour $g$ sa valeur 9,8088, il vient

$$v = 394^m\sqrt{\frac{p'-p}{p'd}[1+t(0,00365)]}.$$

Si on fait $p=0$, on trouve

$$v = 394^m\sqrt{\frac{1}{d}[1+t(0,00365)]}.$$

Ainsi, à la même température, et quelle que soit la pression, la vitesse

d'écoulement d'un gaz dans le vide est en raison inverse de la racine carrée de sa densité.

Dans la théorie que nous venons d'exposer, nous avons considéré les gaz comme des liquides de même densité; par conséquent nous n'avons point tenu compte de leur élasticité; il était alors indispensable de vérifier si l'expérience confirme les résultats du calcul.

283. En 1822, M. Lagerhgelm fit des observations sur l'écoulement de l'air atmosphérique par des orifices pratiqués en mince paroi, et sur l'aspiration qui a lieu à la paroi d'un tuyau court par lequel de l'air s'écoule sous des pressions déterminées. Le travail de M. Lagerhgelm fut communiqué à l'Institut, par M. Olivier : c'est du rapport des commissaires chargés de rendre compte de ce travail que nous avons extrait ce qui suit.

L'appareil de M. Lagerhgelm se compose d'une cloche cylindrique en cuivre battu, plongée dans une cuve pleine d'eau. Lorsqu'on abandonne cette cloche à son propre poids, ou qu'on la presse par un poids additionnel, l'air qu'elle contient est comprimé, et l'excès de pression est exactement mesuré par la différence de niveau de l'eau en dedans et en dehors de la cloche.

Si l'on conçoit maintenant qu'on ait fixé au fond de la cuve un tuyau recourbé, dont une branche traverse l'eau et vienne s'élever sous la cloche au-dessus de son niveau, et dont l'autre branche, après avoir traversé l'épaisseur de la cuve, s'élève verticalement et ait son embouchure recouverte d'une lame mince percée d'une ouverture, il est évident que l'air comprimé s'échappera par cette dernière ouverture, sous une pression mesurée par la différence de niveau. On a fait varier les diamètres des orifices depuis $\frac{4}{100}$ jusqu'à $\frac{11}{100}$ de pied, et les différences de niveau depuis $\frac{19}{100}$ jusqu'à $\frac{161}{100}$. On a tenu compte de la pression barométrique et de la température.

Après avoir mesuré le nombre de pieds cubes d'air comprimé qui s'était écoulé dans un temps déterminé, sous une pression connue et par un orifice donné, on a calculé la quantité d'eau qui se serait écoulée dans le même temps, sous la même pression et par le même orifice, et on a trouvé que ce volume d'eau était au volume d'air dans le rapport moyen de 100 à 2875, c'est-à-dire en supposant que la densité de l'air soit à celle de l'eau comme 1 est à 840, dans le rapport inverse des racines carrées de

ces densités, ce qui s'accorde avec la formule de l'écoulement des fluides incompressibles. En effet, il faut estimer la pression en fluide de même densité : or, une colonne d'air a une hauteur 840 fois plus grande qu'une colonne d'eau de même poids, et comme les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des hauteurs, on voit que l'écoulement d'un fluide incompressible de même densité que l'air devrait, sous la même pression, acquérir une vitesse plus grande que celle de l'eau dans le rapport inverse des racines carrées des densités de ces deux fluides.

Cependant le rapport devrait être un peu plus petit, parce que ce n'est pas de l'air sous la pression de $0^m,76$ qui s'écoule, mais de l'air comprimé dont la densité est plus grande. Si l'auteur n'a pas trouvé de différence sensible, cela tient à ce que la compression n'avait jamais été assez forte pour changer notablement la densité de l'air. Ce résultat avait déjà été obtenu par Banks.

L'auteur plaça ensuite des tuyaux additionnels sur les orifices, et obtint des résultats tout à fait semblables à ceux qui se manifestent dans l'écoulement des fluides incompressibles.

284. En 1826, Daubuisson, ingénieur des mines, fit de nouvelles expériences sur l'écoulement de l'air comprimé, et la comparaison de plus de cent cinquante expériences, faites avec un appareil semblable à celui que nous venons de décrire, a confirmé les résultats obtenus par M. Lagerhgelm, savoir, que la vitesse d'écoulement des gaz peut s'obtenir comme celle des fluides incompressibles. Il résulte, en outre de ces expériences, qu'il y a, pour les gaz comme pour les liquides, une contraction de la veine, et que les coefficients de contraction sont

0,65 pour un orifice percé en mince paroi.
0,93 pour un ajutage court et cylindrique.
0,95 pour un ajutage court, peu évasé.

Ainsi, pour avoir la dépense dans ces différents cas, il faut multiplier la dépense théorique par le coefficient correspondant.

285. Il résulte de là, que si nous désignons par $v$ la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé, par $h$ la hauteur génératrice de la vitesse, c'est-à-dire la hauteur d'une colonne de ce fluide qui ferait équilibre à l'excès de la pression intérieure sur celle de l'atmosphère, on aura.

$$v = \sqrt{2gh};$$

et en désignant par $a$ la surface de l'orifice, et par Q la dépense par seconde, on a

Pour un orifice en mince paroi $Q = 0{,}65\, a \sqrt{2gh}$.
Pour un ajutage court et cylindrique $Q = 0{,}93\, a \sqrt{2gh}$.
Pour un ajutage court, peu évasé $Q = 0{,}95\, a \sqrt{2gh}$.

286. Il est important de remarquer que les dépenses sont relatives à l'air ou au gaz qui s'écoule, sous la pression qui existe dans le réservoir. Si on voulait avoir le volume écoulé sous la pression de l'atmosphère, en désignant par $p$ cette pression estimée en gaz comprimé, il est évident qu'il faudrait multiplier les valeurs de Q par le rapport de $h$ à $p$.

Occupons-nous maintenant des mouvements de l'air dans les longs tuyaux de conduite.

## § 2. VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ COMPRIMÉ, LORSQU'IL S'ÉCOULE PAR DE LONGS TUYAUX DE CONDUITE.

287. Lorsque l'air froid est poussé dans des tuyaux de conduite par des appareils de ventilation, il doit nécessairement éprouver, suivant la longueur et le diamètre du canal, des résistances qui diminuent sa vitesse.

288. La détermination de cette résistance est d'un grand intérêt pour l'exploitation des mines et dans les usines métallurgiques, car il est important de connaître quel peut être l'effet utile de certains procédés d'aérage, jusqu'à quel point on peut éloigner les fourneaux des machines soufflantes, et la perte de vitesse qu'éprouve l'air, suivant leur distance et les diamètres des tuyaux de conduite.

289. Examinons d'abord ce qui se passe dans un long tuyau cylindrique, rectiligne, communiquant par une extrémité avec un réservoir renfermant un gaz comprimé et entièrement ouvert à l'autre extrémité. Il est évident que si le tuyau n'opposait aucune résistance, la vitesse de l'air serait la même dans toute l'étendue du tuyau, qu'elle serait égale à celle qui résulterait de la pression, comme lorsque l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince paroi, augmentée de celle qui résulterait de la détente du gaz, et que la force élastique du gaz serait partout celle de l'atmosphère. Mais la résistance que les tuyaux de conduite opposent au

mouvement diminue la vitesse, de sorte qu'elle ne sera plus celle qui correspond à la pression P dans le réservoir, mais celle qui résulterait d'une pression $p$ plus petite que P. Alors P—$p$ serait la perte de hauteur due à la résistance de la conduite. L'expérience seule peut faire connaître comment cette perte varie avec la longueur du tuyau, son diamètre, la vitesse d'écoulement, avec la nature du tuyau et avec celle du gaz, si ces deux dernières circonstances ont de l'influence.

290. En 1821, Girard fit plusieurs expériences avec l'appareil d'éclairage au gaz de l'hôpital Saint-Louis, et reconnut, 1° que la résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau et au carré de la vitesse; 2° que le coefficient de résistance varie avec la nature des tuyaux; 3° que pour le même tuyau il est le même quand celui-ci est parcouru par l'air ou par le gaz de l'éclairage, ce qui rend très-probable qu'il est le même pour tous les gaz.

291. Les expériences de Girard sur l'écoulement de l'air atmosphérique et du gaz de l'éclairage ont été faites avec des tuyaux de conduite en fonte de 0,10 de diamètre, dont la longueur a varié de 128$^m$ à 622$^m$, et sous une charge à peu près constante de 0$^m$,033 d'eau; et avec des tuyaux de fer de 0$^m$,0158, dont la longueur a varié de 37$^m$ à 126, et sous des charges comprises entre 0$^m$,033 à 0,036 d'eau. Les tuyaux de conduite communiquaient avec un gazomètre à pression constante, et l'écoulement avait lieu librement dans l'air.

292. En 1827, Daubuisson a fait une nombreuse suite d'observations pour déterminer la résistance que l'air éprouve dans les grands tuyaux de conduite.

La grande conduite sur laquelle les expériences ont été faites avait près de 400 mètres de longueur. En la prenant par partie, on mettait en évidence l'effet de la longueur, et pour chaque longueur on faisait varier la pression qui mettait l'air en mouvement; on changeait aussi la vitesse, en mettant, à l'extrémité, des ajutages de différents diamètres; enfin, pour observer l'influence des diamètres des tuyaux, on a opéré sur 2 petites conduites de 55 mètres de longueur, ayant l'une la moitié, l'autre le quart du diamètre de la grande.

La machine soufflante était une trompe à peu près semblable à celle qu'on emploie dans les forges des Pyrénées; elle consistait en un tronc de sapin évidé de 8$^m$,40 de long, et aboutissait à une simple

barrique de $1^m,15$ de diamètre au bouge, et de $1^m,32$ de hauteur; qui était entièrement ouverte par le fond inférieur, et plongeait dans un petit bassin de $0^m,85$ de profondeur. Cette trompe recevait l'eau d'un petit ruisseau voisin, roulant 0,025 à 0,030 mètres cubes d'eau par seconde. On avait disposé avec soin un réservoir garni d'une vanne, afin de connaître exactement la quantité d'eau employée pour mettre en jeu la machine.

Cette machine plongeant de $0^m,85$ dans l'eau, pouvait comprimer l'air qui en sortait, jusqu'au point de lui donner sur l'air atmosphérique un excès de force élastique mesurée par une colonne d'eau de $0^m,85$ de hauteur ou par une colonne de mercure de $0^m,0624$. La vitesse de l'air correspondante à une semblable pression est à peu près de 109 mètres par seconde.

La conduite qui était destinée à aérer une galerie d'écoulement consistait en tuyaux de fer-blanc de $0^m,10$ de diamètre, soudés bout à bout; à son origine elle présentait deux coudes de 90°, mais bien arrondis; à 80 mètres de distance, elle entrait dans la galerie, et se poursuivait en ligne droite jusqu'à 387 mètres. On s'était assuré qu'elle ne présentait aucune issue à l'air.

Les ajutages ou buses que l'on adaptait à son extrémité avaient $0^m,05$, $0^m,03$, et $0^m,02$ de diamètre à leur orifice. Pour la conduite de $0^m,05$ de diamètre ils avaient $0^m,03$; $0^m0,2$; $0^m,01$. La conduite de $0^m,025$ les avait de $0^m02$, et $0^m,01$.

Chaque ajutage portait une virole destinée à recevoir un manomètre à eau; un autre manomètre était placé à l'origine de la conduite. Ces appareils indiquaient la pression de l'air aux deux extrémités de la conduite.

Il est évident que la différence de hauteur des deux manomètres mesurait la perte de pression occasionnée par le frottement; car, si la résistance avait été nulle, la pression aurait été exactement la même aux deux extrémités du canal.

La pression à l'extrémité du canal servait à calculer la vitesse de l'air à sa sortie, par les formules de l'écoulement des fluides incompressibles, et la dépense en tenant compte de la contraction de la veine fluide quand l'écoulement avait lieu par des orifices percés en mince paroi, ou par de courts ajutages.

293. Daubuisson a trouvé ainsi les lois suivantes :

1° La résistance est proportionnelle à la longueur du canal.

2° La résistance croît proportionnellement au carré de la vitesse.

3° La résistance est en raison inverse du diamètre du canal.

Les deux premières avaient déjà été reconnues par Girard.

Ces lois conduisent à des formules très-simples pour déterminer la vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé, à l'extrémité d'un canal.

294. Désignons par P la pression dans le vase, estimée en liquide de la densité du gaz comprimé ; par $p$, la hauteur génératrice de la vitesse effective estimée de la même manière ; par L la longueur du canal, par D son diamètre, et par $d$ le diamètre de l'orifice d'écoulement que nous supposerons terminé par un petit ajutage, et par $k$ le coefficient de frottement. La vitesse moyenne de l'air dans le canal sera à très-peu près $v\frac{d^2}{D^2}$, et nous aurons

$$v = \sqrt{2gp} \quad \text{et} \quad P - p = k.\frac{L.v^2d^4}{D^5}.$$

En éliminant $p$ entre ces deux équations il vient,

$$v = \sqrt{\frac{1}{k}}.\frac{1}{d^2}\sqrt{\frac{P\,D^5}{L + \frac{1}{2gk}\frac{D^5}{d^4}}}.$$

295. Si on voulait avoir la dépense Q, comme $Q = \frac{v\pi d^2}{4}$, et que le coefficient de contraction est 0,93, on trouverait

$$Q = 0{,}93\frac{3{,}1415}{4}\sqrt{\frac{1}{k}}\sqrt{\frac{PD^5}{L + \frac{1}{2gk}\frac{D^5}{d^4}}}.$$

La formule donnée par Daubuisson est

$$Q = 2279\sqrt{\frac{PD^5}{L + 42\frac{D^5}{d^4}}},$$

dans laquelle P est estimé en mercure. Si P était estimé en air, il faudrait évidemment diviser le coefficient par la racine carrée de 10467, rapport de la densité du mercure à celle de l'air, c'est-à-dire, par 102 ; et la formule deviendrait

$$Q = 22{,}34\sqrt{\frac{PD^5}{L + 42\frac{D^5}{d^4}}}. \qquad (1)$$

Alors, pour déterminer la constante $k$, on a l'une des deux équations

$$0{,}93 \times \frac{3{,}1415}{4}\sqrt{\frac{1}{k}} = 22{,}34, \quad \text{et} \quad \frac{1}{2gk} = 42.$$

Ces deux équations donnent à peu près $k = 0{,}0012$, et on a par suite

$$v = 29\sqrt{\frac{PD^5}{L + 42\frac{D^5}{d^4}}}. \qquad (2)$$

Si $D = d$, la formule devient

$$v = 29\sqrt{\frac{PD^5}{L + 42D}}.$$

296. D'après Eytelwein, la vitesse d'écoulement de l'eau dans les mêmes circonstances est représentée par la formule

$$v = 26{,}44\sqrt{\frac{PD^5}{L + 54D}}.$$

297. Les formules (1) et (2) donnent la dépense et la vitesse d'écoulement de l'air froid dans les circonstances ordinaires, avec une approximation qui est suffisante pour tous les cas qui peuvent se présenter. Elles présentent cependant un peu d'incertitude, parce que le coefficient de frottement doit certainement varier avec la nature du tuyau de conduite.

298. D'après les expériences faites par Daubuisson sur des tuyaux de conduite en fer-blanc, la constante $k$ est égale à 0,0012. D'après les expériences de Girard, cette même constante est égale à 0,00088 pour des tuyaux en fonte, et à 0,00128 pour des tuyaux de fer. Les tuyaux de fonte servaient depuis longtemps et étaient tapissés de goudron intérieurement, et les tuyaux de fer étaient rouillés; ces circonstances sont importantes à remarquer, car il est probable que les coefficients dépendent de l'état des surfaces (1).

---

(1) Dans le mémoire de Girard, la vitesse d'écoulement est donnée par la formule

$$\frac{gDP.}{4L} = bv^2,$$

et il a trouvé pour la fonte $b = 0{,}002247$,

et pour les tuyaux en fer $b = 0{,}0032$.

299. Dans ce qui précède nous avons supposé que la conduite était rectiligne; si elle avait des coudes brusques et nombreux, la vitesse serait beaucoup diminuée. Voici à ce sujet les propres expressions de Daubuisson :

« Les coudes des conduites, lorsqu'ils sont brusques et forts, augmentent considérablement la résistance au mouvement : ainsi, dans mes nombreuses expériences sur des conduites coudées, sept angles de 45° ont réduit d'un quart la dépense.

« Dans ces expériences, j'ai vu la résistance croître, de même que pour les conduites menant de l'eau, sensiblement comme le carré de la vitesse, et à très-peu près comme le carré du sinus des angles. Mais, et à ma grande surprise, elle n'augmentait plus proportionnellement au nombre des angles; au delà d'un certain nombre, elle diminuait même : ainsi, 15 angles ont un peu moins réduit la dépense que 7 de même grandeur. Ce phénomène et quelques autres circonstances ont rendu vaines les tentatives que j'ai faites pour établir, même approximativement, la résistance des coudes.

« Dans la pratique, on évitera leur mauvais effet en arrondissant bien ceux que l'on serait obligé de faire. »

## § 3. APPAREIL DESTINÉ A MESURER DIRECTEMENT LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DES GAZ.

300. Dans un grand nombre de circonstances, il est nécessaire de

---

Pour déduire de ces résultats les valeurs de $k$ de notre formule, remarquons que nous avons

$$v^2 = \frac{2gPD}{D+2gkL},$$

ou à peu près $$v^2 = \frac{2gPD}{2gkL} = \frac{PD}{kL};$$

ainsi $$\frac{gPD}{4L.b} = \frac{PD}{kL};$$

d'où $$k = \frac{4b}{g} = \frac{4}{9{,}81}\,b = 0{,}4\,.\,b.$$

Alors on a : pour la fonte, $k = 0{,}4\,.\,0{,}002247 = 0{,}00088$

pour le fer, $k = 0{,}4\,.\,0{,}0032 = 0{,}00128.$

mesurer la vitesse d'un gaz qui s'écoule. On a essayé à plusieurs reprises d'employer pour cela un appareil analogue au moulinet de Woltmann dont on se sert pour mesurer la vitesse des grands cours d'eau; mais on ne connaissait pas la relation entre la vitesse de rotation et la vitesse de l'air. En 1820, M. Kallsténius employa un moulinet à douze ailes pour mesurer la vitesse de l'air qui sortait de la cheminée d'un four à réverbère, et il fit usage d'une formule qu'il n'avait point vérifiée par l'expérience, et qui d'ailleurs est inexacte. En 1838, M. Combes s'est de nouveau occupé de cette question, et il a fait construire un appareil d'un usage très-commode, dans lequel la relation entre la vitesse $v$ de l'air et le nombre N de tours de la roue est donnée par la formule

$$v = a + bN$$

$a$ et $b$ étant des constantes. Cette formule, qui résulte de considérations purement théoriques, a été confirmée par l'expérience.

301. Cet instrument est représenté en élévation, vu de face et en plan, dans les figures 4, 5 et 6 (planche 1re). Il se compose d'un axe très-délié A, terminé par deux pivots très-fins tournant dans des chapes d'agate B, et sur lequel sont montées les quatre ailettes planes C, C, C, C également inclinées sur un plan perpendiculaire à l'axe. Au milieu de l'axe est taillée une vis sans fin *a*, laquelle conduit une roue de 100 dents D, de sorte que celle-ci avance d'une dent pour chaque révolution de l'axe A. L'axe de la roue D porte une petite came *b* qui peut agir sur les dents d'un rochet E de 50 dents; ce rochet est maintenu par un ressort en acier très-flexible F, attaché sur la plaque horizontale G sur laquelle est monté l'instrument. A chaque révolution complète de la roue D, la came fait sauter une dent du rochet; les deux roues sont numérotées de 10 en 10 dents, la première de 1 à 10, et la seconde de 1 à 5. Des aiguilles indicatrices H, H′, fixées au montant I qui porte l'une des chapes de l'arbre des ailettes, servent à marquer le nombre de dents dont chaque roue a avancé, et, par suite, à indiquer le nombre de révolutions de l'axe A. Au moyen d'une détente K et de deux cordons L, L qui servent à la faire mouvoir, on peut, à distance, arrêter le mouvement de rotation des ailes ou leur permettre de tourner sous l'impulsion du courant d'air qui les frappe; ces cordons attachés aux extrémités de la lame *cc*, fixée sous la plaque, servent à la faire tourner sur le bouton *d*; cette lame fait mouvoir la détente K au moyen d'une tige de communication

*e* qui traverse la plaque G par l'ouverture *f*. M est une tige verticale fixée sur la plaque G, et servant à porter l'*anémomètre* et à le maintenir dans la boîte.

302. Pour se servir de cet instrument, on amène d'abord le zéro de chacune des roues vis-à-vis des deux aiguilles indicatrices, puis on place l'instrument sur un support dans la section transversale du canal où circule l'air, l'axe des ailettes étant dans la direction du courant, et l'arrêt étant placé de manière à s'opposer au mouvement. Alors, on s'éloigne de l'instrument, on lâche la détente à un instant donné, et on laisse l'instrument deux ou trois minutes en mouvement, on tire alors le cordon qui doit arrêter le mouvement, et on lit sur l'instrument le nombre des tours effectués pendant la durée de l'expérience. Il ne reste plus qu'à déduire de la formule correspondante à l'instrument qu'on a employé la vitesse d'écoulement de l'air.

303. Pour chaque appareil on détermine les constantes *a* et *b* de la formule en le fixant à l'extrémité d'une barre horizontale, qui reçoit un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe vertical, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie dont on règle la vitesse en faisant varier l'inclinaison des ailes du volant. C'est en déterminant ainsi les constantes *a* et *b* d'un même appareil, par un grand nombre d'expériences, que M. Combes a vérifié l'exactitude de la formule.

304. L'anémomètre de M. Combes est un appareil d'un usage très-commode, et qui est indispensable à tous les ingénieurs qui s'occupent de chauffage; car, ainsi que nous le verrons dans la suite, il n'y a presque point de chauffage qui ne doive être accompagné d'une certaine ventilation, et l'instrument dont nous venons de parler est réellement le seul jusqu'ici qu'on puisse employer pour déterminer directement la ventilation produite.

---

(1) M. Newman, horloger, rue de Seine, n° 56, construit ces appareils avec beaucoup de soins, et il donne la formule qui convient à chacun d'eux; il vend aussi des petits compteurs à arrêts très-commodes pour les expériences anémométriques.

# CHAPITRE IV.

## MOUVEMENTS DE L'AIR CHAUD.

### § 1. — VITESSE DUE A LA PRESSION.

305. Lorsqu'une masse d'air isolée est à une température supérieure à celle de l'air environnant, elle tend à s'élever en vertu d'une force égale à l'excès du poids de l'air déplacé sur son propre poids.

306. La même chose a lieu quand l'air chaud est renfermé dans un tuyau vertical ouvert par les deux bouts. En effet, considérons un tuyau AB (fig. 7, Pl. 1) ouvert par les deux bouts, et renfermant de l'air à $t'°$, l'air extérieur étant à $t°$; représentons par P la pression de l'atmosphère en kilogrammes à la hauteur du point A, sur une surface égale à celle de la section du tuyau; par $p$ et $p'$, les poids de deux colonnes d'air à $t°$ et $t'°$ ayant la hauteur AB et la section du tuyau. Il est évident que la pression exercée au point B de bas en haut sera $P+p$, et que la pression en sens contraire sera $P+p'$; ainsi, si $t'$ est plus grand que $t$, la colonne d'air chaud tendra à s'élever en vertu de l'excès de pression $p-p'$. Ce serait avec la vitesse correspondante à cette pression que l'air s'écoulerait dans le tuyau AB, si, par un moyen quelconque, l'air y était maintenu à une température constante $t'$; par exemple, si on le faisait passer sur une plaque échauffée, placée au bas de la cheminée (fig. 8, Pl. 1).

307. Il résulte de là que la pression qui produit le mouvement de l'air chaud est la même que celle qui s'exercerait dans un siphon renversé ABCD (fig. 9, Pl. 1), à branches égales entre elles et à la hauteur du tuyau d'air chaud, placé dans le vide, et dont une des branches renfermerait un liquide ayant une densité égale à celle de l'air chaud, et l'autre un liquide ayant pour densité celle de l'air froid. L'ef-

fet serait encore le même, si la branche CD renfermait un liquide de même densité que l'air chaud, et si sa hauteur CE était telle que le poids ne fût pas changé. Mais alors, en désignant par $h$ la différence de hauteur des deux colonnes, la vitesse d'écoulement serait celle qu'acquerrait un corps qui tomberait de la hauteur $h$.

Alors, en désignant par $g$ le nombre 9,8088 qui représente l'intensité de la pesanteur, et par $v$ la vitesse d'écoulement, on aurait

$$v = \sqrt{2gh}.$$

La hauteur $h$ est facile à déterminer; car c'est évidemment la dilatation qu'une colonne d'air d'un diamètre constant éprouverait en passant de la température de l'air extérieur à celle de l'air chaud. Alors, en désignant par $t'$ la température de l'air chaud, par $t$ celle de l'air froid, on aura (37), $h = Ha(t' - t)$, et par suite

$$v = \sqrt{2gHa(t'-t)}. \qquad (A)$$

Par exemple, si la colonne d'air chaud avait 10 mètres de hauteur, et si l'air extérieur était à 15° et l'air chaud à 150, la vitesse d'écoulement serait

$$v = \sqrt{19{,}62 \times 10 \times 0{,}00365 \times (150 - 15)} = 9^{m},9.$$

La formule (A) n'est pas rigoureusement exacte, car la hauteur génératrice de la vitesse est

$$H\left(\frac{1+at'}{1+at} - 1\right) = H\left(\frac{a(t'-t)}{1+at}\right).$$

Mais comme $t$ dépasse rarement 20°, $1 + at$ est toujours plus petit que 1,073, et peut par conséquent, sans erreur sensible, être pris pour l'unité.

Il est important de remarquer que $g$ étant estimé en mètres, H doit être également estimé en mètres, que la valeur de $a$ est relative à un degré du thermomètre centigrade, et que la vitesse $v$ représente l'espace parcouru pendant une seconde sexagésimale.

Si on voulait employer toute autre unité que le mètre, et une autre échelle thermométrique, la formule (A) serait applicable, mais les valeurs de $g$ et de $a$ différeraient de celles que nous avons employées; dans l'échelle de Farenheit, on aurait $a = 0{,}00257$.

308. Il semble, au premier abord, que l'expression de la vitesse de l'air chaud puisse s'obtenir en supposant que dans le siphon (fig. 9)

l'air chaud se contracte de manière à acquérir la densité de l'air extérieur, et en prenant la diminution de hauteur pour la hauteur génératrice de la vitesse. Mais on obtiendrait ainsi la vitesse d'écoulement de l'air froid sous la même pression que celle de l'air chaud, et non la vitesse d'écoulement de l'air chaud.

309. Il est évident, d'après ce qui précède, que si le canal d'air chaud était contourné, la vitesse ne dépendrait que de la différence de hauteur des extrémités, et que la longueur du canal serait sans influence, puisque nous n'avons point égard aux frottements.

310. Tout ce qui précède suppose nécessairement que l'air qui s'écoule est de même nature que l'air extérieur; s'il n'en était pas ainsi, les formules précédentes devraient être modifiées; et il est facile de voir que cette modification consisterait à introduire sous le radical un facteur représentant le rapport inverse de la densité tabulaire du gaz à celle de l'air; car, dans les mêmes circonstances, les hauteurs génératrices des vitesses sont évidemment en raison inverse des densités des gaz. Nous examinerons seulement le cas où l'air qui s'écoule a servi à alimenter la combustion.

311. Lorsque de l'air a servi à la combustion du charbon, son oxygène est transformé en acide carbonique, et l'azote n'a éprouvé aucune altération; par conséquent, comme l'air atmosphérique est composé de 79 parties d'azote et de 21 d'oxygène, et comme l'oxygène donne naissance à un égal volume d'acide carbonique, de l'air complétement brûlé sera composé de 79 d'azote et de 21 d'acide carbonique, et on obtiendra évidemment la densité du mélange en multipliant les quantités de ces gaz par leur densité, faisant la somme des produits et divisant par 100; ainsi, la densité de l'azote étant de 0,9757, et celle de l'acide carbonique étant 1,5245, la densité du mélange sera $(21 \times 1{,}5245 + 0{,}9757 \times 79) : 100 = 1{,}09$.

Mais dans tous les foyers, jamais l'air n'est complétement brûlé; toujours une portion s'échauffe sans avoir éprouvé d'altération, et cette quantité est très-variable, car elle dépend de la disposition de l'appareil de combustion, de la grosseur des morceaux de combustible, de leur arrangement, des dimensions de la masse en ignition, et, toutes choses égales d'ailleurs, elle dépend encore de l'activité du foyer, et par conséquent du tirage; elle est en général très-petite pour les combustions vives

et très-grande pour celles qui sont languissantes. Cependant, pour des foyers bien disposés et un tirage convenable, on peut, sans erreur sensible, estimer à moitié la quantité d'air qui échappe à la combustion, et négliger les matières combustibles qui sont entraînées, attendu qu'elles ne sont en quantité appréciable que pendant des instants très-courts, lorsqu'on charge les foyers. D'après cela, la densité de l'air à moitié brûlé sera $(1 + 1{,}09) : 2 = 1{,}045$, et on aura pour la vitesse d'écoulement

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t'-t)}{1{,}045}}. \qquad (b)$$

La formule exacte serait

$$v = \sqrt{\frac{2gHa\,(t'-t)}{(1+at)1{,}045}}. \qquad (c)$$

Cette dernière formule diffère trop peu de la première pour qu'il soit nécessaire de l'employer. La formule (*b*) diffère elle-même si peu de la formule (A), que l'erreur qui peut résulter de l'emploi de cette dernière, pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'air qui a servi à la combustion, est tout à fait négligeable, relativement au degré d'approximation qu'on peut espérer. Ainsi, désormais nous employerons la formule (A) pour l'air pur et pour l'air qui a servi à la combustion.

## § 2. — VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR CHAUD DANS UN CANAL CYLINDRIQUE COMPLÉTEMENT OUVERT PAR SES DEUX EXTRÉMITÉS.

312. Dans ce qui précède, nous avons considéré les mouvements de l'air chaud comme étant parfaitement identiques avec ceux d'un liquide de même densité, et nous n'avons point eu égard aux frottements qui se manifestent dans les tuyaux de conduite, et qui dépendent à la fois de leur longueur, de leur diamètre, et de la vitesse du courant. L'assimilation du mouvement de l'air à celui des liquides est autorisée par un grand nombre d'expériences, et surtout par celles qui ont été faites par Girard et par Daubuisson. Quant au frottement, on conçoit qu'il doive produire des résistances qui peuvent avoir une grande influence sur la vitesse.

313. En comparant les résultats de l'expérience avec ceux de la formule précédente, on trouve, en effet, de très-grandes différences surtout quand la température $t'$ est très-élevée. Ces différences avaient d'abord été attri-

buées à l'action des vents, à la suie qui s'accumule dans les cheminées, mais elles résultent évidemment du frottement de l'air dans les tuyaux de conduite.

314. En admettant que les lois du frottement de l'air chaud et de l'air froid soient les mêmes; en désignant par P la pression statique exprimée en air chaud, par $p$ la pression également en air chaud qui produit la vitesse effective, par H la hauteur de la cheminée, par D son diamètre, et par K le coefficient de frottement, on aurait pour une cheminée complétement ouverte à ses deux extrémités

$$P - p = \frac{KH}{D} v^2;$$

et comme $p = v^2 : 2g$, cette expression devient

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KHv^2}{D}; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gPD}{D + 2gKH} \qquad (B)$$

315. J'ai essayé, il y a un grand nombre d'années, de vérifier l'exactitude de cette formule et de déterminer la valeur de K pour différentes substances. J'ai opéré sur des cheminées circulaires en terre cuite, dont les hauteurs ont varié de $3^m,65$ à $13^m,38$, et les diamètres de 0,08 à 0,21; sur des cheminées en tôle d'une hauteur comprise entre $4^m,11$ et $16^m,78$; enfin sur une seule cheminée en fonte de 17,05 de hauteur et de 0,20 de diamètre. Toutes ont été montées successivement sur le même fourneau, représenté en coupe par la figure 10, planche 1. Cette précaution était nécessaire pour que les appareils ne différassent que par la cheminée. L'air brûlé se rendait directement dans la cheminée, afin que l'espace parcouru fût seulement la hauteur de la cheminée. La grille avait une très-grande surface relativement à la section de la plus grande cheminée, et le combustible ne la couvrait qu'en partie, afin que l'air n'éprouvât pas de résistance sensible en traversant la grille. L'ouverture du cendrier était aussi très-grande. On ne brûlait dans le foyer que du charbon de bois exempt de fumerons. Les températures aux deux extrémités de la cheminée étaient indiquées par des thermomètres dont les réservoirs étaient placés dans l'axe de la cheminée. Pour déterminer la vitesse d'écoulement, on introduisait rapidement sous la grille par l'orifice du cendrier une mèche imbibée d'essence de térébenthine enflammée, fixée à l'extrémité d'une tige de fer, et on la retirait aussitôt; on produisait ainsi dans le foyer une petite quantité de fumée que l'air chaud entraînait avec lui;

alors, en observant l'instant de l'introduction de la fumée dans le foyer et celui de son apparition au sommet de la cheminée, on avait le temps qu'elle employait à parcourir la cheminée, et on en déduisait facilement la vitesse de l'air.

316. Les résultats de ces expériences sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule (B), et ils ont donné pour le coefficient K les valeurs suivantes : 0,0127 pour les cheminées en poterie, 0,0050 pour les cheminées en tôle, 0,0025 pour la cheminée en fonte.

Les tuyaux en terre cuite et en tôle qui ont été employés n'avaient jamais servi, et ils n'ont point été recouverts de noir de fumée pendant la durée des expériences. La cheminée de fonte, au contraire, servait depuis longtemps; elle était tapissée de suie et de noir de fumée. D'après cela, le coefficient relatif à la fonte conviendrait probablement à toute autre substance recouverte de suie, et c'est par conséquent celui qu'il faudrait admettre pour les cheminées ordinaires.

317. L'inégalité des valeurs de K pour les différentes substances m'a d'abord surpris, car il n'en est pas ainsi dans l'écoulement de l'eau. Mais il est très-probable que l'égalité de résistance des tuyaux de différente nature au mouvement de l'eau provient de ce que la substance du tuyau est mouillée par l'eau, qu'il en reste à la surface une couche très-mince, et que réellement l'eau s'écoule dans un tube de ce liquide. Or, rien n'indique que les choses se passent ainsi dans l'écoulement des gaz, et il est au contraire beaucoup plus probable que pour ces corps le frottement a lieu entre le gaz et la surface même du tuyau. Nous avons d'ailleurs signalé une différence semblable dans les mouvements de l'air froid, lorsque nous avons rapporté les expériences faites par Girard (298). Cet ingénieur a trouvé que le coefficient de frottement n'était pas le même pour la fonte que pour le fer.

Si le frottement des gaz dans les tuyaux provient réellement du frottement de ces corps contre les surfaces des tuyaux, comme tout semble l'indiquer, il n'est pas douteux que le coefficient de frottement dépendra non-seulement de la nature de la substance dont le tuyau est formé, mais encore de l'état de sa surface.

318. Il serait fort à désirer que ces expériences fussent reprises, en employant des tuyaux de même nature, mais dont les surfaces soient dans des états différents. On pourrait produire le mouvement de l'air

au moyen d'un gazomètre dans lequel on ferait varier la pression, ou par une cheminée d'appel ; mais, dans ce dernier cas, on arriverait à des résultats beaucoup plus exacts en mesurant la vitesse par l'anémomètre de M. Combes. En employant des tuyaux d'une très-grande longueur, on obtiendrait aussi une évaluation plus précise des coefficients de frottement.

319. Il est important de remarquer que l'équation (B), qui a été établie dans l'hypothèse d'une cheminée cylindrique, conviendrait également aux cheminées carrées dont le côté serait égal au diamètre du cercle. En effet, nous verrons bientôt que, pour un canal prismatique d'une forme quelconque, le frottement est proportionnel au contour de la section et en raison inverse de sa surface ; or, le rapport du contour à la surface est le même pour le cercle et pour le carré circonscrit.

320. *Influence de la longueur et de la courbure des tuyaux.* En plaçant sur le fourneau dont j'ai déjà parlé, des tuyaux de tôle différemment contournés (fig. 12, pl. 1), j'ai trouvé que les vitesses observées étaient représentées d'une manière satisfaisante par l'équation

$$v^2 = \frac{2g\mathrm{PD}}{\mathrm{D} + 2g\mathrm{KL}} \qquad \text{(C)}$$

dans laquelle P est égal à H*at*, et L représente la longueur développée du tuyau.

Ainsi les changements de direction du tuyau n'ont pas d'influence sensible.

321. J'ai aussi vérifié ce dernier fait en plaçant des tuyaux à l'orifice du cendrier (fig. 11, pl. 1). Dans les mêmes circonstances et pour la même longueur du tuyau, la vitesse d'écoulement était la même, quel que fût le nombre des coudes.

322. Si un circuit était composé d'une longueur L parcourue par l'air chaud, et d'une longueur L′ parcourue par l'air froid, en désignant par $\delta$ la densité de l'air froid relativement à l'air chaud, comme le coefficient de frottement est indépendant de la densité du gaz, on aurait

$$\mathrm{P} - \frac{v^2}{2g} = \frac{\mathrm{KL}}{\mathrm{D}} v^2 + \frac{\mathrm{KL}'}{\mathrm{D}\delta} v^2. \qquad \text{(D)}$$

323. *Observations sur les variations de vitesse de l'air en parcourant les tuyaux de conduite.* Les variations de vitesses résultent de deux causes différentes : du décroissement de pression et du refroidissement. L'une tend à augmenter la vitesse, l'autre à la diminuer. On peut facilement ap-

précier les effets produits en remarquant que le poids de l'air qui passe dans un même temps par une section quelconque du canal, doit toujours être le même, et par conséquent que les vitesses dans deux sections égales doivent être en raison inverse des densités de l'air qui les traverse.

324. L'effet qui résulte du décroissement de pression est inappréciable dans presque tous les cas. En effet, considérons une cheminée de 40 mètres de hauteur renfermant de l'air chaud à 300°. Supposons que la pression de l'atmosphère au sommet soit de $0^m,76$. Cette pression en air froid sera de 7950 mètres, et en air à 300° de 16655 mètres. Au bas de la cheminée elle sera de $16655+40\ (1+0{,}00365\times 300)=16739$. Ainsi aux deux extrémités de la cheminée les densités seront dans le rapport des nombres 16739 et 16655, ou dans celui des nombres 1,005 et 1.

Dans les appareils de ventilation des mines, dans les grandes conduites de gaz et même dans les souffleries de cubilots, la pression étant toujours inférieure à $0^m,20$ d'eau, le rapport des pressions est plus petit que celui de 1033 à 1053, c'est-à-dire plus voisin de l'unité que 0,98. Ainsi, dans tous ces cas, la variation de vitesse due à la variation de pression est toujours négligeable.

325. Mais il n'en est pas ainsi de la variation de vitesse due au refroidissement. Dans deux sections égales où les excès de la température de l'air chaud sur celle de l'air extérieur seraient $t'$ et $t''$, les vitesses seraient dans le rapport de $1+at''$ à $1+at'$; et la première serait égale à la seconde multipliée par $(1+a(t''-t'))$. Ainsi, pour une différence de 100, le rapport des vitesses serait celui de 1 à 1,365.

326. Il semble, d'après cela, que dans la formule du mouvement de l'air dans les cheminées, il faille tenir compte des variations de résistance qui proviennent du refroidissement, et que la formule que nous avons établie en prenant seulement la résistance correspondante à la température moyenne, doive s'éloigner beaucoup de la réalité. Mais il n'en est pas ainsi. En faisant le calcul dans l'hypothèse que la température décroisse uniformément, et en faisant la somme des résistances dans tous les éléments, on trouve en effet une vitesse plus petite que celle qu'on obtient en calculant la résistance d'après la température moyenne; mais cette plus petite vitesse correspond à la température au sommet de la cheminée, et en la ramenant à ce qu'elle serait à la température moyenne de l'air dans la cheminée, température qui est celle de l'air écoulé, dans

l'hypothèse que nous avons admise, on trouve des nombres qui diffèrent très-peu de ceux qu'on obtient par la formule (B).

Par exemple, en calculant la vitesse d'écoulement de l'air à l'extrémité d'une cheminée ayant 20 mètres de hauteur, 0,5 de diamètre, en supposant l'air extérieur à 0°, la température au bas de la cheminée de 100, et un refroidissement complet au sommet, on trouve $v = 2{,}25$, tandis que la formule (B) donne $v = 2{,}63$, en prenant 50° pour la température moyenne. Mais la première vitesse est celle de l'air à 0°, et la seconde le suppose à 50°. Alors, en désignant par $s$ la section de l'orifice de la cheminée, les volumes de gaz à 50° écoulés dans une seconde seraient, dans le premier cas, $s \times 2{,}25\,(1 + 0{,}00365 \times 50) = s \times 2{,}65$ ; et, dans le second, $s \times 2{,}63$. Ainsi on voit que, dans les deux cas, les volumes d'air écoulés diffèrent bien peu. Il est fort heureux qu'il en soit ainsi, car des formules qui dépendraient de la loi de décroissement de la température dans une cheminée, ne pourraient servir à rien.

327. *Vitesse d'écoulement de l'air chaud dans un canal composé de deux branches verticales renfermant de l'air à des températures différentes et réunies par un canal horizontal, toutes les parties ayant le même diamètre.* Il y a deux cas à considérer : celui où la branche horizontale est à la partie inférieure, et celui où elle réunit les parties supérieures. Occupons-nous d'abord du premier (fig. 13, pl. 1).

Désignons par H et H′ les hauteurs AB et CD, et par $t$ et $t'$ les excès des températures de l'air qu'elles renferment sur celle de l'air extérieur, par L la longueur de la partie horizontale, et par $h$ la hauteur d'une colonne d'air froid équivalente à la pression de l'atmosphère au point D.

La pression verticale de haut en bas au point C sera

$$h + \frac{H'}{1 + at'}.$$

Cette pression se transmettra horizontalement contre la tranche *mn*. Cette même tranche recevra une pression en sens contraire qui sera représentée par

$$h + H' - H + \frac{H}{1 + at}.$$

Alors l'excès de cette dernière pression sur la première, en négligeant dans le numérateur les termes qui renferment $a^2$, sera

$$\frac{a(H't' - Ht)}{(1 + at)(1 + at')}.$$

Ainsi l'écoulement aura lieu par le point D ou par le point A, suivant qu'on aura

$$H't' > Ht, \quad \text{ou} \quad H't' < Ht.$$

Supposons que la première condition soit satisfaite. Pour avoir la hauteur motrice, il faudra estimer la pression en une colonne d'air chaud à $t'^{o}$ ; elle sera alors

$$\frac{a(H't' - Ht)}{1+at},$$

et, pour obtenir la vitesse d'écoulement, il faudra, en négligeant les variations de vitesses qui résultent des variations de température dans le circuit, remplacer dans la formule (B), P par l'expression précédente, et L par H+H'+L, alors il viendra

$$v^2 = \frac{2ga(H't' - Ht)D}{(1+at)(D+2gK(H+H'+L))}.$$

328. Supposons maintenant que le canal ait la forme représentée par la figure 14 (pl. 1), et cherchons d'abord la pression en air froid qui produirait l'écoulement par l'extrémité D. En conservant les mêmes dénominations que précédemment, la pression de bas en haut au point C sera $h$—H':$(1+at')$. Cette pression se transmettra horizontalement contre la tranche *mn*. La pression exercée en sens contraire contre cette tranche sera évidemment

$$h - (H' - H) - \frac{H}{1+at},$$

et la différence entre cette pression et la précédente sera

$$h - H' + H - \frac{H}{1+at} - h + \frac{H'}{1+at'},$$

expression qui se réduit à

$$\frac{a(Ht - H't')}{(1+at)(1+at')}.$$

Et pour obtenir la vitesse d'écoulement, il faudra, comme précédemment, transformer cette colonne d'air froid en une autre de même poids à la température $t'$ ; ce qui s'obtiendra en la multipliant par $(1+at')$; alors la vitesse d'écoulement sera

$$v^2 = \frac{2ag(Ht - H't')D}{(1+at)(D+2gK(H+H'+L))}.$$

Il est important de remarquer que l'écoulement de l'air chaud par

l'extrémité D située au-dessous du point A, peut se réaliser par le seul fait du refroidissement progressif de l'air; et pour cela il faudrait ralentir autant que possible le refroidissement de l'air dans la branche AB, et, au contraire, favoriser autant que possible le refroidissement des branches BC et CD.

329. On trouverait facilement, d'après cela, la vitesse d'écoulement de l'air qui circulerait dans un tuyau composé d'un nombre quelconque de branches ascendantes et descendantes, dont on connaîtrait les hauteurs et pour chacune d'elles la température moyenne de l'air.

## § 3. — VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR CHAUD DANS UNE CHEMINÉE RÉTRÉCIE SUPÉRIEUREMENT.

330. Lorsqu'une cheminée est rétrécie par la partie supérieure, la vitesse de l'air dans le canal est diminuée, et par suite le frottement; alors une plus grande partie de la pression génératrice est conservée, et par conséquent la vitesse d'écoulement par l'orifice doit être d'autant plus grande que l'orifice est plus petit par rapport à la section de la cheminée et à la limite on doit arriver à la vitesse qui aurait lieu s'il n'y avait pas de frottements. J'ai vérifié ces indications de la théorie sur un grand nombre de cheminées, et elles s'accordent parfaitement avec les expériences faites par Daubuisson sur l'écoulement de l'air froid produit par une pression directe.

331. Pour obtenir l'expression de la vitesse en fonction des divers éléments dont elle dépend, conservons la notation déjà employée, et désignons par S la section de la cheminée, par $s$ la surface de l'orifice, et par $\varphi$ le coefficient de contraction de la veine, coefficient qui varie suivant que l'écoulement a lieu par un orifice percé en mince paroi, par un ajutage court et cylindrique ou évasé (284). En observant que les vitesses sont en raison inverse des sections, puisque le même volume de gaz doit passer à chaque instant par une tranche horizontale quelconque, nous aurons

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KH}{D} \cdot \frac{s^2\varphi^2}{S^2} v^2 ; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gKHs^2\varphi^2} \cdots \qquad (E)$$

332. En substituant à K dans cette équation les valeurs relatives aux

cheminées en terre cuite, en tôle et en fonte, et pour $\varphi$ ses différentes valeurs, on aura les formules qui conviennent à tous les cas.

333. En supposant le coefficient de contraction égal à l'unité, ce qui est suffisamment exact quand l'orifice n'est pas percé dans une mince paroi, on a

$$v^2 = \frac{2gPDS^2}{DS^2 + 2gKHs^2} \cdots \quad (F)$$

334. Si on suppose le rapport $S:s$ très-grand, le terme $2gKHs^2$ pourra être négligé devant $DS^2$, et l'équation (F) deviendra

$$v = \sqrt{2gP}.$$

Ce résultat était prévu, parce que, dans la circonstance supposée, la vitesse de l'air dans la cheminée étant nulle, il n'y a pas de frottement.

335. Comparons maintenant la vitesse dans une cheminée rétrécie par la partie supérieure, à celle qui se produirait dans une cheminée de même hauteur qui aurait pour diamètre celui de l'orifice. En désignant par $v'$ cette dernière vitesse, on aura

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{\frac{DS^2(2gKH + d)}{d(DS^2 + 2gKHs^2)}}.$$

Si on suppose S très-grand par rapport à $s$, on pourra négliger $2gKHs^2$, et cette expression deviendra

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{1 + \frac{2gKH}{d}}. \quad (G)$$

Elle représente le maximum du rapport $\frac{v}{v'}$. Mais, pour l'obtenir, il n'est pas nécessaire de donner à $S:s$ une valeur extrêmement grande, car quand on fait croître ce rapport, celui de $v$ à $v'$ augmente d'abord très-rapidement, et ensuite avec une prodigieuse lenteur; c'est ce qui résulte de la forme de l'expression (G). Un exemple particulier fera mieux voir la loi de ces accroissements. Supposons une cheminée en terre cuite de 10 mètres de hauteur, et supposons $d = 0{,}20$, le maximum du rapport de $v'$ à $v$ donné par la formule (G) est 3,53; et en donnant successivement les valeurs 2, 3, 4, 5 au rapport $S:s$, on trouve pour $v:v'$; 3,07; 3,42; 3,52; 3,53. Ainsi, en donnant à la cheminée un diamètre deux ou trois fois plus grand que celui de l'orifice, on obtient sensiblement le maximum d'effet. C'est une circonstance importante dans la pratique.

336. Si l'air froid parcourait un canal de même diamètre que la cheminée avant d'y pénétrer, en désignant par L la longueur totale du circuit, et en négligeant l'influence des variations de vitesses résultant des variations de température, on aurait

$$v^2 = \frac{2g\mathrm{PDS}^2}{\mathrm{DS}^2 + 2g\mathrm{KL}s^2};$$

et si on supposait que tout le circuit augmentât de diamètre de manière que la vitesse de l'air y fût insensible, l'orifice supérieur restant constant, on trouverait pour le rapport de $v : v'$ de la vitesse dans le second cas à la vitesse dans le premier

$$\frac{v}{v'} = \sqrt{1 + \frac{2g\mathrm{KL}}{d}}.$$

## § 4. — VITESSE DE L'AIR CHAUD DANS UN CANAL RÉTRÉCI A LA PARTIE INFÉRIEURE.

337. En général, dans des tuyaux d'une forme quelconque qui conduisent de l'eau, on admet que, pour chaque rétrécissement brusque du canal dans le sens du mouvement du liquide, la perte de hauteur motrice est égale à $(v''^2 - v'^2) : 2g$, $v'$ et $v''$ étant les vitesses dans les tuyaux qui se succèdent; et que pour chaque rélargissement brusque, toujours dans le sens du mouvement, et pour chaque étranglement par un diaphragme, la perte de hauteur motrice est égale à $(v'' - v')^2 : 2g$, $v'$ et $v''$ ayant la même signification que précédemment. Alors en supposant que ces lois subsistent pour les gaz et en désignant par $v'$ la vitesse dans l'orifice inférieur de la cheminée, et en conservant les notations déjà employées, on aurait pour l'écoulement de l'air par une cheminée rétrécie à la partie inférieure

$$\mathrm{P} - \frac{v^2}{2g} = \frac{\mathrm{KH}v^2}{\mathrm{D}} + \frac{(v' - v)^2}{2g}.$$

Et en représentant par S et $s$ les sections de la cheminée et de l'orifice, et par $\varphi$ le coefficient de contraction, on aurait $v\mathrm{S} = v's\varphi$, et par suite

$$\mathrm{P} - \frac{v^2}{2g} = \frac{\mathrm{KH}v^2}{\mathrm{D}} + \frac{v^2}{2g}\left(\frac{\mathrm{S} - s\varphi}{s\varphi}\right)^2;$$

d'où

$$v^2 = \frac{2g\mathrm{PD}s^2\varphi^2}{\mathrm{D}s^2\varphi^2 + 2g\mathrm{KH}s^2\varphi^2 + \mathrm{D}(\mathrm{S} - s\varphi)^2}. \qquad (\mathrm{H})$$

338. Cette formule ne s'accorde pas avec l'expérience. Nous rapporterons d'abord quelques faits qui en démontrent l'inexactitude avec évidence.

339. Dans les grands systèmes de chaudières à vapeur, dans lesquels la cheminée a 30 mètres de hauteur, 1 mètre de côté au sommet, le circuit total de 50 à 60 mètres, et où la température de l'air dans la cheminée est à peu près de 300°, on brûle par heure 700 kilog. de houille, consommation qui correspond à une vitesse d'écoulement de $700 \times 18 \times (1 + 0{,}00365 \times 300) : 3600 = 7^{m},33$; tandis que la vitesse due à la hauteur motrice est de $25^{m},33$. Ainsi, il y a à peu près les 0,70 de la vitesse perdus par toutes les résistances qui se rencontrent dans le trajet. Cependant, les grilles ont une surface libre très-peu différente de celle de la section de la cheminée, et cette surface est toujours couverte d'une couche épaisse de combustible, dont les fragments, plus ou moins agglutinés, produisent un rétrécissement énorme dans la section totale du passage de l'air, et occasionnent une résistance beaucoup plus considérable encore par la division des veines d'air. En outre, les grandes cheminées sont toujours coniques et ont ordinairement un diamètre deux ou trois fois plus grand à la partie inférieure qu'à la partie supérieure. Enfin, à ces deux espèces de résistances il faut encore ajouter les frottements dans tout le trajet.

Or, le passage de l'air dans la cheminée rélargie, en admettant la loi du mouvement des liquides, et le frottement, réduiraient à eux seuls la vitesse à moins de moitié. Car en n'ayant égard qu'à ces deux circonstances, on aurait

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KLv^2}{D} + \frac{(v'-v)^2}{2g}; \quad \text{et par suite } v = \frac{\sqrt{2gP}}{2{,}13}.$$

Il résulterait de là que l'influence de la grille serait très-petite; conséquence inadmissible, car s'il y a réellement une grande perte de hauteur motrice par les changements de vitesse, elle doit être incomparablement plus grande pour le passage de l'air à travers la grille que pour toutes les autres résistances.

340. Dans les appartements chauffés par des feux de cheminée, l'air pénètre par les fissures des portes et des fenêtres; or, la somme totale des surfaces de ces orifices est très-petite relativement à la section transversale de la cheminée, et ces orifices, par leur forme étroite et

allongée, souvent capillaire, doivent occasionner une résistance beaucoup plus grande qu'un orifice circulaire de même surface. En outre, l'air est souvent appelé à travers plusieurs pièces, et à chaque passage d'une section très-petite dans une autre très-grande, on perdrait toute la charge correspondante à la vitesse dans l'étranglement. Alors, en admettant que les mouvements des gaz soient soumis aux mêmes lois que ceux des liquides, on ne peut plus rendre compte de la quantité énorme d'air appelé par nos foyers domestiques, quantité qui, pour la même consommation de combustible, est souvent dix fois plus grande que dans les foyers fermés et à grilles, parce qu'une très-petite partie de l'air appelé traverse le combustible.

341. J'ai fait d'ailleurs un grand nombre d'expériences directes dont les résultats ne permettent pas de douter que les formules admises pour l'écoulement de l'eau ne conviennent pas à l'écoulement des gaz.

Les expériences dont il est question ont été faites sur des cheminées en poterie, en tôle et en fonte, de différentes hauteurs et de différents diamètres. Les diaphragmes étaient des feuilles de tôle percées de petits orifices et appliquées, tantôt à l'ouverture du cendrier, tantôt directement au bas de la cheminée. Dans le premier cas, les bords des plaques étaient parfaitement lutés contre le cadre du cendrier. Dans le second, les plaques étaient introduites dans une petite caisse en briques ABCD (fig. 10, pl. I), ouverte en avant et d'environ $0^m,1$ de hauteur; la plaque était posée sur le fond de la caisse où se trouvait une large ouverture communiquant avec le foyer; on lutait avec soin les bords de la plaque et on fermait la caisse avec des briques et de la terre.

342. D'abord, dans toutes ces expériences j'ai obtenu sensiblement la même vitesse quand la plaque était placée à l'ouverture du cendrier ou au bas de la cheminée, tandis que dans l'hypothèse que les mouvements de l'air suivent les lois observées pour l'écoulement de l'eau, la différence aurait dû être très-grande.

343. En outre, j'ai toujours obtenu des vitesses au sommet de la cheminée beaucoup supérieures à celles qui résultent de la formule (H), en supposant le coefficient de contraction égal à 0,65, et ces différences étaient d'autant plus grandes pour la même cheminée et dans les mêmes circonstances, que le diamètre de l'orifice était plus petit relativement à celui de la cheminée. Ces différences étaient d'ailleurs trop grandes pour

que la variation du coefficient de contraction ou celle de la hauteur à laquelle la veine d'air pouvait être portée dans la cheminée, pussent en rendre compte.

Je rapporterai seulement des expériences faites à la même température sur une cheminée de fonte de 17 mètres de hauteur et de $0^m,20$ de diamètre. La cheminée étant d'abord tout ouverte et ensuite fermée successivement à la partie inférieure par des plaques percées d'ouvertures circulaires de $0^m,11$; $0^m,055$ et $0^m,0275$ de diamètre, les vitesses observées ont été de

$$4^m,73;\ 2^m,84;\ 1^m,70;\ \text{et}\ 0^m,81.$$

344. Dans ces expériences, la vitesse due à la colonne d'air chaud était égale à $10^m,74$; la résistance due au frottement était de $0,21\ v^2$; la surface de la section de la cheminée était égale à 0,031, et par conséquent en désignant par $s$ la surface de l'orifice et en prenant 0,65 pour coefficient de contraction, la formule (H) donne d'abord

$$v^2 = \frac{2gP}{1 + \frac{2gKH}{D} + \left(\frac{S - \varphi s}{\varphi s}\right)^2} = \frac{2gP}{2 + \frac{2gKH}{D} + \frac{S}{\varphi s}\left(\frac{S}{\varphi s} - 2\right)};$$

et par suite

$$v = \frac{10,74}{6,16 + \frac{0,031}{0,65s}\left(\frac{0,031}{0,65.s} - 2\right)}.$$

Alors en substituant successivement pour $s$, 0,0094; 0,0023; et 0,0006, on trouve pour les trois dernières vitesses, les nombres

$$2,33;\ 0,56;\ \text{et}\ 0,13.$$

On voit que les résultats du calcul diffèrent beaucoup de ceux que donne l'expérience. Les observations faites sur les autres cheminées en poterie conduisent à la même conséquence.

345. Il résulte de ce qui précède, que toute la hauteur due au changement de vitesse n'est pas perdue; or, en cherchant à quelle partie de cette hauteur correspondent les vitesses observées, on trouve que, pour les trois diaphragmes qui ont été employés, les pertes effectuées sont 0,37; 0,27, et 0,03 de celles que suppose la formule (H). Ainsi les pertes

ne sont pas représentées par une fraction constante de la hauteur d'air correspondante à la différence des vitesses.

346. En supposant que les pertes de hauteur soient représentées par

$$\frac{s}{S}\left(\frac{v'^2 - v^2}{2g}\right),$$

on trouve, pour les vitesses d'écoulement, les nombres

3,1; 1,8; et 0,98;

qui n'excèdent ceux qui résultent de l'observation que d'une quantité assez petite. Cette même hypothèse, appliquée aux expériences faites sur les autres cheminées, a donné des résultats analogues.

347. On doit conclure de tout ce que nous venons de dire, 1° que, dans un canal parcouru par l'air, la perte de hauteur motrice occasionnée par un étranglement, est beaucoup plus petite que la hauteur qui correspond à la différence des vitesses dans l'étranglement et après; 2° que la perte réelle est un peu plus grande que la différence des hauteurs correspondantes aux vitesses multipliée par le rapport de la surface de l'orifice à celle du canal qui suit l'étranglement; 3° que le rélargissement brusque d'un canal, du moins dans une certaine étendue et dans de certaines limites, a peu d'influence.

348. Les phénomènes qui se produisent dans le cas dont il s'agit sont très-compliqués et n'ont point encore été étudiés par les géomètres; mais on comprend facilement que l'absence de toute élasticité dans l'eau et l'élasticité complète de l'air doivent produire, dans certaines circonstances, de grandes différences dans les phénomènes qui accompagnent l'écoulement de ces deux fluides. On sait, par exemple, que, pour les corps dépourvus d'élasticité, il y a dans le choc une très-grande perte de force vive; tandis que quand les masses sont parfaitement élastiques, il n'y a point de force vive perdue. On ne peut pas assimiler les phénomènes qui se passent dans le choc des corps à ceux qui se produisent quand une veine d'air sort d'un petit orifice pour pénétrer dans un tuyau beaucoup plus large; mais il est très-probable que les veines d'air qui sortent des petits orifices compriment les tranches qui se trouvent devant elles, et que celles-ci, par leur détente, restituent au moins en partie l'excès de force vive que la veine possédait dans l'orifice.

349. D'après ce qui précède, dans une cheminée rétrécie par la partie

inférieure, en supposant l'orifice percé dans une paroi épaisse, la vitesse d'écoulement sera comprise entre celles qui résultent des deux équations

$$P-\frac{v^2}{2g}=\frac{KHv^2}{D}+\frac{(S-s)^2}{2gs^2}v^2\ldots(1);\ \text{et}\ P-\frac{v^2}{2g}=\frac{KHv^2}{D}+\frac{s}{S}\cdot\frac{S^2-s^2}{2gs^2}v^2\ldots(2).$$

Les vitesses d'écoulement qui résultent de la première équation sont beaucoup plus petites que les vitesses réelles; celles qui se déduisent de la seconde sont plus grandes, mais elles s'en rapprochent beaucoup plus.

350. Les vitesses d'écoulement par l'orifice supérieur de la cheminée, déduites de ces deux équations, sont

$$v^2=\frac{2gPDs^2}{Ds^2+2gKHs^2+D(S-s)^2};\quad\text{et}\quad v^2=\frac{2gPDSs^2}{Ss^2(D+2gKH)+Ds(S^2-s^2)}.$$

351. Lorsqu'on supposera S très-grand par rapport à $s$, on pourra négliger au dénominateur de la première équation les termes qui renferment $s$, et elle deviendra

$$v^2=\frac{2gPs^2}{S^2};$$

et la vitesse dans l'orifice sera

$$v'^2=2gP.$$

352. Ainsi, dans l'hypothèse sur laquelle est fondée cette équation, si on augmente progressivement le diamètre d'une cheminée dont l'orifice inférieur reste constant, la vitesse dans l'orifice augmentera jusqu'à une certaine limite qui est la vitesse due à la hauteur de la colonne d'air chaud; ainsi on ne gagnerait par l'accroissement de diamètre que la hauteur motrice correspondante aux frottements, et cet effet s'obtiendrait sensiblement en donnant à la cheminée un diamètre trois ou quatre fois plus grand que celui de l'orifice inférieur, attendu que les frottements étant proportionnels aux carrés des vitesses, ils diminuent suivant une loi très-rapide à mesure que les diamètres augmentent.

353. D'après l'équation (2) qui, comme nous l'avons dit, s'approche beaucoup plus de la réalité que la première, les vitesses dans l'orifice vont en croissant indéfiniment à mesure que le diamètre de la cheminée augmente, et cette vitesse peut devenir beaucoup plus grande que la vitesse due à la hauteur de la colonne d'air chaud. Cette circonstance se trouve vérifiée dans la dernière des expériences rapportées (346) : la

vitesse due à la hauteur était $10^m,73$; la vitesse observée à la partie supérieure était de $0^m,81$ lorsque la surface du diaphragme était égale à $0^m,0006$; or, comme la section de la cheminée était de $0^m,0314$, la vitesse dans l'orifice était de $0,81 \times 0,0314 : 0,0006 = 42^m,12$, vitesse à peu près quatre fois plus grande que celle qui est due à la hauteur.

354. L'accroissement de vitesse dans l'orifice inférieur serait encore beaucoup plus considérable si, à partir des bords de l'orifice, la section de la cheminée augmentait progressivement et d'une manière continue jusqu'à une certaine hauteur, car on sait qu'alors il n'y aurait point de hauteur motrice perdue par les changements de vitesse, il ne resterait que la perte qui résulte des frottements.

355. Cette influence du rélargissement d'une cheminée sur l'appel qu'elle produit, est un fait très-important dans la construction des appareils de chauffage et de ventilation, car elle permet, avec la même dépense de chaleur, de vaincre de plus grandes résistances ou de produire le même effet en abaissant la température de l'air brûlé ou de l'air chaud.

356. Si l'orifice communiquait avec un canal de même section, et c'est ce qui arrive toujours dans les fourneaux, la vitesse d'écoulement, en supposant qu'il n'y eût pas d'autres résistances que celles dont il a été question, se calculerait au moyen de la formule

$$P - \frac{v^2}{2g} = v^2(A + B + C),$$

dans laquelle A représenterait le frottement dans le tuyau d'appel, B la perte de hauteur due au changement de section du canal, et C les frottements dans la cheminée. En supposant le canal et la cheminée carrés ou circulaires, les quantités A et C seraient de la forme $KLv'^2 : D$; K étant le coefficient de frottement, L la longueur du canal, D son diamètre ou son côté, et $v'$ la vitesse de l'air; ainsi, dans ce cas, on calculerait facilement leurs valeurs.

Si le changement de section du canal avait lieu d'une manière continue dans une étendue suffisante pour que la veine d'air la remplît complément, la quantité B se réduirait à la perte due au frottement dans la partie évasée du canal, perte analogue à celle qui est produite par le passage de l'air dans un canal ayant la forme d'un tronc de cône ou de pyramide, et dont nous donnerons l'expression dans le paragraphe suivant. Mais si le changement de section était brusque, on obtiendrait une ap-

proximation suffisante de la perte de hauteur motrice en lui supposant la valeur indiquée (346), et en admettant qu'il n'y ait pas de contraction de la veine; la formule se réduirait alors à

$$\frac{v'^2 - v^2}{2g} \cdot \frac{s}{S} = \frac{S^2 - s^2}{2gs^2} \cdot \frac{s}{S} v^2 = \frac{S^2 - s^2}{2gsS} v^2.$$

357. On obtiendra ainsi des vitesses qui seront un peu trop grandes, mais qui s'approcheront beaucoup plus de la réalité que si on prenait pour la perte due au changement de section, l'expression $(v' - v)^2 : 2g$ qui convient aux liquides.

## § 5. — MOUVEMENT DE L'AIR DANS DES CHEMINÉES DE DIFFÉRENTES FORMES.

358. Les formes de cheminées que nous avons examinées jusqu'ici ne sont point celles qui sont généralement employées; toujours les cheminées, du moins les grandes cheminées d'usine, ont une forme pyramidale tantôt continue, tantôt composée de prismes de diamètres décroissants; souvent aussi elles sont coniques. Nous examinerons successivement ces différentes formes.

359. *Cheminées composées de parties cylindriques ou prismatiques.* Dans ces sortes de cheminées, les diamètres des parties cylindriques ou prismatiques vont toujours en augmentant à partir du sommet. En désignant par D le diamètre du prisme ou du cylindre qui termine la cheminée, par D', D'' D''', etc., les diamètres des autres cylindres, par L L' L'', etc., leurs longueurs, par $v$, $v'$, $v''$, etc., les vitesses de l'air dans chacun d'eux, on aura

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + \frac{KL'}{D'} v'^2 + \frac{KL''}{D''} v''^2 + \text{etc.}, + Rv^2.$$

$Rv^2$ représentant la somme des pertes de charge dues aux résistances que l'air éprouve avant d'arriver à la cheminée, et à celles qui résultent des changements brusques de vitesse dans la cheminée, et qui serait exactement pour chacun, $(v'^2 - v'^2) : 2g$.

360. *Cheminées coniques ou pyramidales.* Supposons d'abord la cheminée conique, et désignons par H sa hauteur, par D le diamètre à la base, par $d$ celui du sommet, et posons $D = md$. On trouve par le calcul

que la résistance due au frottement est représentée par

$$\frac{KHv^2}{4d(m-1)} \cdot \frac{m^4-1}{m^4} \cdot \frac{1}{\cos\varphi}.$$

361. Quand $m$ dépassera 2 ou 3, et que la cheminée formera un cône très-allongé, circonstances qui se rencontrent toujours dans les grandes cheminées d'usine, on pourra prendre pour la résistance, $KHv^2 : 4d(m-1)$.

En désignant par $Rv^2$ la somme des résistances que l'air éprouve avant de pénétrer dans la cheminée, on aura

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KH}{4D(m-1)} \frac{m^4-1}{m^4\cos\varphi} v^2 + Rv^2.$$

362. Si la cheminée était une pyramide à quatre faces, la vitesse d'écoulement serait exactement la même que celle qui aurait lieu dans le cône inscrit; c'est ce qui résulte de ce que nous avons dit (319). Ainsi les formules précédentes conviennent aux deux cas.

363. Si la cheminée était formée d'une série de cônes ou de pyramides tronqués, on arriverait à une approximation bien suffisante, en la considérant comme formée par la pyramide ou la surface conique qui passerait par les bases supérieures des cônes ou des pyramides tronqués.

364. *Cheminée d'une forme prismatique, mais d'une section quelconque.* Lorsqu'un liquide ou un gaz se meut dans un canal prismatique d'une forme quelconque, les molécules de la circonférence de chaque tranche, en frottant contre les parois du tuyau, éprouvent une résistance qui se transmet de proche en proche aux molécules de la tranche, et il en résulte une force retardatrice constante proportionnelle à la surface du canal, au carré de la vitesse et en raison inverse de la section. Cette force est alors représentée par

$$\frac{K'CHv^2}{S},$$

expression dans laquelle $K'$ représente un nombre constant, C le contour d'une tranche, S sa surface, H la longueur du cylindre, et $v$ la vitesse d'écoulement.

365. Pour appliquer cette formule à un tuyau circulaire, il faut faire $C = \pi D$, et $S = \pi D^2 : 4$; il vient alors

$$\frac{4K'Hv^2}{D},$$

tandis que la formule que nous avons employée dans le cas dont il s'agit est

$$\frac{KHv^2}{D},$$

ainsi $4K' = K$, donc $K' = K : 4$. Alors en prenant pour K les nombres rapportés précédemment, la résistance dans un tuyau prismatique sera

$$\frac{KCHv^2}{4S}.$$

366. Le cercle étant la figure qui, pour une étendue superficielle constante, a le moins de contour, il sera toujours avantageux d'employer des sections circulaires. Par exemple, pour une section carrée ayant l'unité de surface $C : S = 4$, et pour un cercle de même surface, le même rapport est $2\sqrt{\pi} = 3{,}54$. Mais, comme nous l'avons déjà dit, la résistance serait la même pour un cercle et pour le carré circonscrit.

367. Pour faire voir combien la forme de la section a d'influence sur le frottement, comparons deux cheminées de même section, l'une carrée, l'autre rectangulaire; supposons, par exemple, que la section commune soit de $0^m,20$, et que l'une ait $0^m,44$ de côté, et l'autre 1 mètre sur $0^m,20$. Le contour de la première sera $0^m44 \times 4 = 1^m,76$, et celui de la seconde sera $2^m,40$, et par conséquent pour l'unité de longueur la résistance de la première section sera $\frac{K}{4} \cdot \frac{1,76}{0,20}$, et celle de la seconde $\frac{K}{4} \cdot \frac{2,4}{0,2}$; résistances qui sont entre elles comme 176 : 240.

## § 6. — DÉTERMINATION DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR DANS UNE CHEMINÉE PRÉCÉDÉE D'UN CIRCUIT D'UNE FORME QUELCONQUE.

368. Dans tous les cas qui pourront se présenter, la hauteur motrice sera $P = Ha(t' - t)$, H étant la hauteur de la cheminée, $a$ le coefficient de dilatation des gaz 0,00365, $t'$ la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée, et $t$, celle de l'air extérieur. Et la vitesse d'écoulement s'obtiendra au moyen de l'équation

$$P - \frac{v^2}{2g} = (M + N)v^2;$$

équation dans laquelle $v$ est la vitesse d'écoulement à la partie supérieure de la cheminée, $Mv^2$ la somme des hauteurs d'air qui repré-

sentent les frottements dans toute l'étendue du circuit, et N la somme des hauteurs d'air qui correspondent aux changements brusques de vitesse.

Pour toutes les parties prismatiques à base carrée ou circulaire, la résistance sera représentée par

$$\frac{KL}{D} v'^2 .$$

Et pour les parties prismatiques d'une section quelconque la résistance sera exprimée par

$$\frac{KCL}{4S} v'^2 .$$

Quant à la valeur de N, elle serait complétement nulle, si la section du canal était constante ou si les variations de section avaient lieu d'une manière continue. Mais s'il y a des changements brusques de section, il y aura une perte de hauteur correspondante qu'il est impossible d'évaluer avec exactitude. En la supposant la même que dans le mouvement des liquides, elle sera sans aucun doute beaucoup trop grande, et le calcul donnera une vitesse trop petite. Si on admet pour la perte relative aux rétrécissements brusques l'évaluation approximative de l'article 346, la vitesse sera trop grande, mais cependant beaucoup plus voisine de la vérité que la première. D'après cela, il sera convenable de faire le calcul dans les deux hypothèses, pour obtenir deux limites entre lesquelles se trouvera la vitesse réelle.

### § 7. EFFETS PRODUITS PAR LA RENCONTRE DES COURANTS.

369. Lorsque plusieurs tuyaux débouchent dans un même canal, les veines d'air se prolongent au delà des orifices, et dans certaines circonstances elles peuvent par leur action mutuelle modifier les vitesses d'écoulement de l'air dans les tuyaux. Si, par exemple, deux tuyaux A et B (fig. 15, pl. 1re) débouchaient par des orifices en regard dans un tuyau C, l'influence des veines serait nulle si les deux courants avaient la même vitesse, parce que tout se passerait comme si les veines venaient choquer un plan fixe placé entre elles; mais si les vitesses étaient inégales, celle qui aurait la plus grande vitesse diminuerait la vitesse de l'autre, et fermerait plus ou moins l'orifice par lequel celle-ci s'écoule. Un grand nombre

de phénomènes ne permettent pas de douter de ce fait; d'ailleurs, ces veines doivent agir les unes sur les autres à peu près comme des veines d'eau, et on sait, d'après les expériences de Savart, que quand deux veines de même section agissent en sens contraire, et que l'une d'elles a un très-petit excès de vitesse sur l'autre, cette dernière est refoulée jusqu'à l'orifice du vase, et que l'écoulement cesse complétement. On éviterait les effets qui résultent de ces chocs en plaçant dans le tuyau un diaphragme MN, comme l'indique la figure 1, (pl. 2.)

370. Des phénomènes du même genre se produiraient si les deux tuyaux étaient à angle droit, comme l'indique la figure 2, (pl. 2), et ils se trouveraient en outre compliqués de l'effet résultant des pressions latérales. Mais on éviterait complétement ces effets au moyen du diaphragme MNP. Si le tuyau était évasé comme dans la figure 3, le rétrécissement du tuyau en avant de l'orifice du tuyau latéral produirait l'effet d'un diaphragme; l'influence du choc des veines pourrait être négligée, mais celle qui proviendrait de la diminution de pression due au rélargissement du tuyau pourrait être très-grande.

371. Dans le cas où un courant d'air chaud déboucherait horizontalement dans une cheminée d'appel verticale, il pourrait arriver que l'appel fût tout à fait anéanti, quoique la section de la cheminée fût plus grande que celle du courant d'air chaud, si la vitesse de ce dernier était très-grande, parce qu'alors il fermerait la cheminée comme une soupape.

C'est un fait que j'ai eu l'occasion de remarquer un grand nombre de fois, et notamment dans une grande cheminée d'appel que j'avais fait construire dans une fabrique de soude et qui faisait partie d'un appareil de condensation. La cheminée avait $13^m,30$ de hauteur et près de $0^m,75$ de section; le canal à fumée d'un four à soude y débouchait horizontalement (fig. 4, pl. 2). Lorsqu'on commença à allumer le feu du four à soude, l'appel eut lieu : il augmenta pendant quelque temps, diminua ensuite, et finit par être complétement nul quand le fourneau commença à travailler. Je reconnus bientôt la cause de ce phénomène singulier, et j'y remédiai au moyen d'une cloison MN placée dans l'intérieur de la cheminée d'appel, de manière que l'air chaud ne fût mis en liberté, dans la cheminée, qu'après avoir pris une direction verticale (fig. 5, pl. 2).

372. Ainsi, il faut avoir le plus grand soin, dans toutes les cheminées

d'appel qui reçoivent le courant d'air chaud perpendiculairement à leur direction, de diriger le jet d'air chaud parallèlement à la cheminée.

## § 8. PRESSIONS EXERCÉES PAR LES GAZ EN MOUVEMENT CONTRE LES TUYAUX DE CONDUITE.

373. Les pressions dont il est question sont importantes à examiner, car c'est le signe de la différence entre la pression intérieure et la pression extérieure qui fait connaître si on peut, sans dépense de travail, faire une prise d'air chaud dans un tuyau, ou l'employer pour produire un appel d'air extérieur.

374. On doit à Daniel Bernouilli la méthode suivante pour trouver la pression intérieure dans un tuyau de conduite d'eau. Si on représente par $p$ la pression de l'atmosphère en eau, par P la pression statique en un certain point de la conduite, et par P′ la hauteur d'eau correspondante à la vitesse d'écoulement dans le point que l'on considère; la pression de l'eau, dans tous les sens, sera représentée par $p+\mathrm{P}-\mathrm{P}'$. Ainsi l'excès de la pression intérieure sur celle de l'air sera $\mathrm{P}-\mathrm{P}'$; elle sera positive quand P sera plus grand que P′, et négative dans le cas contraire.

375. Il est très-probable que cette loi s'appliquerait aux tuyaux de conduite de gaz quand ils ont une section constante dans toute leur étendue, ou qu'ils sont seulement rétrécis à l'orifice d'écoulement. En admettant qu'il en soit ainsi, on trouve 1° que dans une cheminée complétement ouverte à son sommet et communiquant avec un canal ayant la même section dans toute son étendue, la pression extérieure au bas de la cheminée est plus grande que la pression intérieure, et que cette différence décroît uniformément jusqu'au sommet de la cheminée où elle est nulle; 2° que, dans une cheminée rétrécie à la partie supérieure seulement, à une certaine hauteur la pression intérieure est égale à la pression extérieure; que, pour des points plus élevés, la pression intérieure l'emporte sur la pression extérieure; que le contraire a lieu pour des points situés plus bas, et que la différence des deux pressions augmente à mesure que l'on s'éloigne du point où les pressions sont égales.

376. Mais quand il y a des changements de sections dans la conduite, et surtout des rétrécissements brusques, la loi de Bernouilli n'est plus

applicable, et c'est le cas où il serait le plus important de connaître la valeur de la pression intérieure. On doit cependant regarder comme très-probable qu'à chaque étranglement la différence entre la pression intérieure, avant et après l'étranglement et à une petite distance de l'étranglement, doit peu différer de la hauteur d'air qui correspond à l'accroissement de vitesse.

377. Cette considération seule suffit pour indiquer que, toutes les fois qu'on a une prise d'air à faire dans une cheminée, il faut que l'orifice d'appel soit suivi d'un étranglement; et que, quand on veut au contraire introduire de l'air extérieur dans une cheminée, il faut que l'orifice d'accès soit placé après un étranglement. A la vérité, rien n'indique quelle doit être l'étendue du rétrécissement qu'on doit produire; mais comme on l'effectue toujours avec des plaques mobiles au moyen desquelles on fait varier à volonté le rétrécissement de la cheminée, on peut toujours le rendre tel, que la différence entre la pression intérieure dans la cheminée et celle qui existe dans le canal qui doit amener l'air extérieur ou qui doit conduire l'air chaud, soit favorable à l'effet qu'on veut produire. Mais comme dans tous les cas la cheminée doit encore conserver une certaine puissance de tirage, l'ouverture du registre se trouve déterminée par cette circonstance; ainsi la connaissance des pressions latérales dans les cheminées serait réellement sans utilité pour la pratique.

### § 9. — MAXIMUM DE TIRAGE DES CHEMINÉES.

378. Nous avons examiné, dans ce qui précède, les moyens de calculer la vitesse d'écoulement de l'air chaud à l'extrémité libre d'une cheminée; en multipliant cette vitesse par la section de la cheminée, on aura le volume d'air chaud dépensé par seconde, et par suite son poids en multipliant le volume par la densité. Ce poids est ce qu'il y a de plus important, car c'est d'après ce poids qu'on pourra déterminer celui du combustible qu'on pourra faire brûler dans le foyer.

379. L'équation qui donne la vitesse d'écoulement de l'air chaud dans une cheminée d'une forme quelconque est toujours de la forme

$$v = \sqrt{\frac{\mathrm{H}a(t'-t)}{\mathrm{M}}}, \qquad (1)$$

dans laquelle H représente la hauteur de la cheminée, $t'$ et $t$ les températures de l'air chaud et de l'air extérieur, $a$ le nombre 0,00365, et M une quantité qui varie avec la forme et les dimensions du canal. En supposant que la section au sommet de la cheminée soit carrée et que son côté soit D, le volume d'air écoulé par seconde sera

$$D^2\sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}}, \qquad (2)$$

et le poids de l'air écoulé par seconde sera

$$\frac{1^k,3}{1+at'}D^2\sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}} = 1^k,3D^2.\sqrt{\frac{Ha}{M}\cdot\frac{t'-t}{(1+at')^2}}.$$

380. On voit d'abord à l'inspection de cette dernière expression que la dépense d'air en poids, dans la même cheminée, dépend uniquement de la fraction

$$\frac{t'-t}{(1+at')^2}\cdots \qquad (3)$$

et, par conséquent, que cette dépense est bien loin de croître proportionnellement à la vitesse, comme il était d'ailleurs facile de le prévoir.

381. En cherchant par les règles ordinaires du calcul différentiel si cette quantité est susceptible de prendre une valeur maximum pour une certaine valeur de $t'$, on trouve que cela a lieu pour

$$t' = \frac{1}{a} + 2t = 274^\circ + 2t.$$

Ce fait est d'une très-haute importance dans la pratique, car il en résulte que la puissance d'une cheminée ne croît que jusqu'à une certaine limite de température, et qu'au delà de cette température la chaleur entraînée par l'air brûlé occasionne une diminution d'effet.

382. La température qui correspond au maximum de tirage est réellement variable avec la température extérieure; car, si l'air extérieur était à — 10, elle serait de 254°; et si l'air extérieur était à 15°, elle serait de 304°. Mais comme l'effet produit n'éprouve que des variations insensibles pour toutes les températures extérieures quand l'excès de température de l'air chaud est compris entre 250 et 350°, on peut prendre la température de 300° comme étant celle qui correspond dans tous les cas au maximum d'effet.

383. Pour faire voir de quelle manière le tirage varie avec la température, j'ai renfermé dans le tableau suivant les valeurs de l'expres-

sion (3) pour un grand nombre de valeurs de $t'$ comprises entre 30° et 1000°, en supposant $t = 0$.

| TEMPÉRATURES DE L'AIR CHAUD. | VALEURS DE $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$. | TEMPÉRATURES DE L'AIR CHAUD. | VALEURS DE $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$. |
|---|---|---|---|
| 30° | 4,93 | 260 | 8,273 |
| 40 | 5,51 | 270 | 8,278 |
| 50 | 5,98 | 275 | 8,279 |
| 60 | 6,35 | 280 | 8,276 |
| 70 | 6,66 | 290 | 8,275 |
| 80 | 6,92 | 300 | 8,27 |
| 90 | 7,13 | 310 | 8,26 |
| 100 | 7,33 | 320 | 8,25 |
| 110 | 7,48 | 350 | 8,21 |
| 120 | 7,62 | 400 | 8,13 |
| 130 | 7,73 | 450 | 8,03 |
| 140 | 7,83 | 500 | 7,92 |
| 150 | 7,92 | 550 | 7,80 |
| 160 | 7,98 | 600 | 7,62 |
| 170 | 8,05 | 650 | 7,56 |
| 180 | 8,09 | 700 | 7,44 |
| 190 | 8,14 | 750 | 7,33 |
| 200 | 8,17 | 800 | 7,22 |
| 210 | 8,21 | 850 | 7,11 |
| 220 | 8,23 | 900 | 7,00 |
| 230 | 8,25 | 950 | 6,90 |
| 240 | 8,26 | 1000 | 6,8 |
| 250 | 8,27 | | |

384. On voit à l'inspection de ce tableau que le tirage augmente d'abord très-rapidement avec la température, et ensuite beaucoup plus lentement, qu'il est sensiblement constant de 250° à 300, qu'au delà il diminue, et qu'à 1000° il est plus petit qu'à 100°.

385. D'après ce qui précède, il est évident que le maximum d'effet produit par la cheminée dont la vitesse est représentée par la formule (1), est

$$1{,}3 \times D^2 \times 8{,}27\sqrt{\frac{aH}{M}} = 0{,}64D^2\sqrt{\frac{H}{M}}.$$

# CHAPITRE V.

## DES CHEMINÉES.

386. Les appareils de chauffage varient de forme et de disposition, non-seulement avec l'effet qu'on veut produire, mais encore avec la nature du combustible employé, et suivant qu'on doit utiliser seulement la chaleur rayonnante, ou celle qui est emportée par l'air brûlé, ou à la fois ces deux espèces de chaleur. Il y a cependant trois parties distinctes dans tous les appareils de chauffage : le foyer, le lieu où la chaleur est utilisée, et la cheminée. Les deux premières se confondent quelquefois, comme dans les foyers domestiques, dans les fourneaux à fondre certains métaux; mais la dernière est toujours distincte et ne manque jamais, excepté dans les appareils où le renouvellement de l'air dans le foyer est produit par une action mécanique.

387. Les cheminées remplissent deux fonctions : 1° elles rejettent à de grandes hauteurs dans l'atmosphère l'air qui a servi à la combustion, et qui, chargé d'acide carbonique et de vapeurs combustibles, serait toujours incommode et souvent nuisible s'il se dégageait à de petites hauteurs; 2° elles produisent dans le foyer l'appel d'air nécessaire à la combustion.

### § 1. — DÉTERMINATION DES DIMENSIONS DES CHEMINÉES.

388. L'effet que doit produire une cheminée est toujours donné, car il se réduit à effectuer la combustion d'un poids connu de combustible dans un certain temps, ou à faire sortir par l'extrémité de la cheminée, dans le même temps, un volume donné d'air. Nous avons déterminé (260) les

volumes d'air qui proviennent de la combustion de 1 kilogramme des différents combustibles.

389. La puissance d'une cheminée dépend de sa hauteur, de la température moyenne que l'air brûlé y conserve, et de sa section.

390. La hauteur de la cheminée a une grande influence sur l'effet qu'elle produit. Considérons une cheminée communiquant avec un canal d'une longueur L de même diamètre, la vitesse d'écoulement sera représentée par la formule

$$v = \sqrt{\frac{2gHatD}{D+2gK(L+H)}}.$$

Si le canal avait une autre section que celle de la cheminée, et si l'air éprouvait dans son mouvement des résistances quelconques, cette même formule pourrait encore représenter la vitesse d'écoulement, pourvu qu'on donnât à L une valeur déterminée; car toute résistance, quelle qu'elle soit, peut être remplacée par celle que présenterait un tuyau d'un diamètre donné, mais d'une longueur convenable.

On voit, à l'inspection de cette formule, que, quand on augmente H, le numérateur de la fraction placée sous le radical augmente dans une proportion plus grande que le dénominateur, et d'autant plus grande que L est lui-même plus grand, et que si L était très-grand relativement à H, la vitesse croîtrait à peu près proportionnellement à la racine carrée de H. Cette circonstance se rencontre quelquefois, comme dans la ventilation des mines; mais, dans les cas les plus ordinaires, l'influence de la hauteur de la cheminée est très-grande à cause de la résistance que présente le foyer. Par exemple, pour une grande chaudière à vapeur, si on avait $L = H$, $D = 1$ et $H = 30$, la valeur de L se trouverait rendue quatre fois plus grande par la résistance de la grille, et le dénominateur de la fraction serait représenté par

$$1+0{,}04\,(120+30) = 1+4{,}80+1{,}20.$$

Alors, en doublant la hauteur de la cheminée, le dernier terme seulement de l'expression précédente serait doublé, et la somme des termes qui était 7,00 deviendrait 8,20; le dénominateur ne serait donc augmenté que dans le rapport de 8,2 à 7, tandis que le numérateur de la fraction serait doublé.

391. Il n'y a réellement qu'un seul cas où la hauteur de la cheminée

soit sans influence sensible, c'est celui où tout le circuit est réduit à la cheminée, ou, par conséquent, $L=0$, quand toutefois la cheminée est assez élevée pour qu'on puisse négliger D relativement à $2g$KH. Ces circonstances se sont présentées dans les expériences que j'ai rapportées précédemment, parce que la grille n'était couverte de combustible qu'en partie, et que les diamètres des cheminées étaient très-petits, relativement à la hauteur.

392. Ainsi, il faut toujours donner aux cheminées la plus grande hauteur possible; on obtient par là un puissant élément de tirage, qui ne coûte qu'un accroissement de dépense peu considérable, et qui est souvent d'une grande utilité.

393. La température moyenne de l'air chaud dans une cheminée dépend de la température de l'air à la sortie du foyer, du refroidissement que l'air a éprouvé en parcourant les surfaces de chauffe, et enfin du refroidissement qu'il a éprouvé dans la cheminée elle-même pendant son trajet. Ces causes sont si compliquées et dépendent d'un si grand nombre de circonstances, qu'il est réellement impossible d'en calculer l'influence et de déterminer, du moins avec une approximation suffisante, la température moyenne de la fumée dans un appareil donné.

Lorsqu'un appareil est construit et fonctionne, on peut obtenir la température moyenne de la fumée en prenant celles de la partie supérieure et de la partie inférieure de la cheminée, ou seulement celle de la partie inférieure quand la cheminée est en briques.

394. Mais quand un appareil est à construire, on peut d'abord avoir une limite inférieure de la température de l'air à son entrée dans la cheminée, en remarquant qu'elle doit toujours être supérieure à celle du corps à chauffer, et on peut obtenir une valeur approximative de la température moyenne de l'air dans la cheminée en la supposant égale à celle des appareils analogues. C'est ce dernier parti qu'il faut toujours prendre. Par exemple, pour les fourneaux des chaudières à vapeur, bien disposés, il faut compter sur 300° pour la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée : c'est le nombre que donnent les expériences faites sur les fourneaux dont les chaudières ont les dimensions convenables, c'est-à-dire, qui présentent assez de surface de chauffe pour utiliser convenablement la chaleur développée dans le foyer, et qui cependant laissent à l'air, à son entrée dans la cheminée, une température suffi-

sante pour produire un bon tirage. Dans les autres cas, nous indiquerons la température moyenne qu'il faut supposer à la fumée dans la cheminée.

Mais il est bien important de remarquer que le tirage variant très-peu avec la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée, comme on a pu le voir dans le tableau de la page 167, une erreur même considérable dans l'estimation de cette température aurait peu d'influence, surtout si la température moyenne était voisine de 300°. Par exemple de 100 à 300°, et 300 à 500°, la variation de tirage est plus petite que $\frac{1}{20}$ du tirage maximum.

395. Il résulte du tableau que nous venons de citer, que dans tous les cas où les corps doivent être chauffés à une très-haute température, et où, par conséquent, la fumée doit être abandonnée à une température très-élevée, il y aura toujours de l'avantage à refroidir la fumée jusqu'à 300°, même en perdant complétement la chaleur; car c'est à cette température que les cheminées possèdent le maximum de tirage réel, c'est-à-dire, qu'elles appellent le plus grand volume d'air froid, et, par conséquent, c'est à cette température qu'on obtiendra l'appel demandé avec le minimum de section de la cheminée. Mais il est bien rare que dans une usine on n'ait pas l'emploi utile de la chaleur qu'on obtiendrait en abaissant la température de la fumée jusqu'à 300°.

396. Les deux premiers éléments de tirage d'une cheminée, la hauteur et la température moyenne de l'air brûlé, étant connus d'après ce qui précède, il ne reste plus qu'à déterminer la section de la cheminée. Mais cette section dépend de toutes les résistances que la colonne d'air chaud doit vaincre dans son trajet, et il est nécessaire d'examiner quelle peut être celle qui résulte du foyer.

397. Dans tous les foyers où des circonstances particulières n'exigent pas une combustion lente et une très-grande surface rayonnante, la surface totale de la grille sur laquelle la combustion s'opère, excède de beaucoup la section de la cheminée, et la somme des surfaces libres que laissent les barreaux la dépasse peu; mais comme les grilles sont toujours couvertes d'une couche épaisse de combustible, ces orifices sont obstrués en grande partie, de sorte que le foyer produit toujours un rétrécissement dans le canal, et par suite une résistance, même en supposant qu'il n'y ait pas d'autre perte de hauteur motrice que celle qui

est due au passage de l'air dans les canaux étroits formés par les fragments du combustible. Il ne faudrait pas croire que la haute température du foyer compensât même en partie la résistance que l'air éprouve à traverser le combustible, car la colonne d'air chaud qui se trouve au-dessus du combustible produit moins de tirage que si cet air se trouvait à la température moyenne de la cheminée.

398. D'ailleurs, deux faits bien constatés démontrent avec la dernière évidence que les foyers produisent une grande résistance; c'est, d'une part, la suppression complète du passage de l'air à travers la grille quand on ouvre la porte d'un foyer; et, de l'autre, la grande différence qui existe entre la vitesse d'écoulement de l'air chaud, calculée en ayant égard à toutes les résistances, excepté celle de la grille, et la vitesse réelle d'écoulement.

399. J'ai insisté sur l'influence des grilles, parce qu'on a prétendu qu'elles ne produisaient point de résistance, et qu'on pouvait, sans changer la quantité de combustible consommé, les rendre quatre fois plus grandes ou quatre fois plus petites.

On peut en effet, dans certains cas, faire varier l'étendue d'une grille dans des limites assez étendues, sans diminuer sensiblement la consommation de combustible, mais il s'en faut de beaucoup que ces limites soient aussi grandes qu'on l'a prétendu, et cette circonstance ne provient pas de ce que les grilles n'opposent pas de résistance, mais de ce que la combustion peut s'effectuer avec des volumes d'air très-différents.

400. Considérons un foyer dans lequel on brûle une certaine quantité de combustible, et supposons que la moitié de l'air échappe à la combustion, c'est ce qui arrive ordinairement, du moins dans les foyers bien disposés. Si l'on diminue l'étendue de la grille, en conservant la même épaisseur de combustible, la résistance de la grille augmentera, il passera moins d'air à travers le combustible, mais il passera plus vite, la combustion sera plus vive, il y aura moins de perte de chaleur par rayonnement, et une plus petite quantité d'air échappera à la combustion; alors cette dernière circonstance compensant, au moins en partie, la diminution du volume de l'air qui traverse le foyer, la consommation de combustible diminuera peu. Au delà de la limite à laquelle tout l'oxygène sera transformé en acide carbonique, il se formera de l'oxyde de carbone, et la quantité d'air allant toujours en dimi-

nuant à mesure qu'on diminue l'étendue de la grille, on conçoit que jusqu'à ce que le produit de la combustion ne soit plus que de l'oxyde de carbone, la réduction de la grille, et par suite celle du volume d'air qui la traverse, ne produiront pas dans la consommation du combustible une diminution correspondante à celle du volume d'air. Mais quand ce volume sera réduit à $\frac{1}{4}$ de ce qu'il était d'abord, la consommation de combustible sera proportionnelle à celle du volume d'air; cette consommation décroîtra même plus rapidement à cause de l'abaissement de température de l'air brûlé par suite d'une combustion incomplète. Si on suppose maintenant qu'on augmente l'étendue de la grille, des phénomènes opposés se produisent : la résistance de la grille diminue, le volume d'air appelé augmente, mais il traverse le combustible avec moins de vitesse, il y a plus de perte par rayonnement, la température du foyer s'abaisse, et par suite il y a plus d'air et de gaz combustibles qui s'échappent dans la cheminée sans altération, et l'accroissement de consommation de combustible augmente suivant une loi beaucoup moins rapide que celui du volume d'air appelé par la cheminée. Les mêmes phénomènes se produiraient par la variation d'épaisseur du combustible: en l'augmentant on obtiendrait exactement les effets qui résultent de la diminution de surface de la grille; en la diminuant, on produirait ceux qui accompagnent l'augmentation de surface de la grille.

On voit, d'après cela, que dans un foyer d'où l'air s'échapperait à moitié brûlé, on pourrait, sans faire varier beaucoup la consommation de combustible, diminuer la surface de la grille ou augmenter l'épaisseur du combustible, ou augmenter l'étendue de la grille ou diminuer l'épaisseur du combustible; mais ces variations, lorsqu'elles dépasseraient certaines limites, diminueraient beaucoup l'effet produit ou par la formation de l'oxyde de carbone, ou par l'abaissement de la température de l'air brûlé par le mélange d'une trop grande quantité d'air qui aurait échappé à la combustion.

401. La condition la plus importante à remplir dans un foyer, serait de transformer en acide carbonique tout l'oxygène de l'air qui a traversé le combustible.

Cette condition ne peut pas évidemment être réalisée pour les combustibles qui brûlent avec flamme, parce que la combustion des gaz exige que l'air qui a traversé la masse de combustible renferme encore une

certaine quantité d'oxygène; et comme le volume des gaz qui se dégagent est très-variable pendant la combustion, si le volume d'air introduit était suffisant lorsqu'il s'en dégage le plus, il se trouverait trop grand plus tard. Elle pourrait l'être pour les combustibles qui brûlent sans flamme, si on donnait à la surface de la grille une étendue suffisante, et à la couche de combustible une épaisseur convenable; mais il y aurait toujours des filets d'air qui parcourraient de plus longs circuits que les autres, et qui pourraient former de l'oxyde de carbone, et la plus légère augmentation d'épaisseur produirait infailliblement cet effet. Or, comme la formation de l'oxyde de carbone diminue dans une proportion énorme la quantité de chaleur développée par le combustible, on conçoit qu'il est important de l'éviter, et qu'il est beaucoup plus avantageux de produire la combustion en employant un excès d'air.

402. On a reconnu par expérience que les foyers les plus avantageux sont ceux d'où l'air se dégage seulement à moitié brûlé, c'est-à-dire renfermant encore 10 pour cent d'oxygène, et que pour les foyers de chaudières à vapeur cette condition est remplie lorsque les grilles ont une surface telle que la quantité de houille brûlée par heure et par décimètre carré soit à peu près de $1^k,0$ à $1^k,2$, l'épaisseur du combustible étant environ de 6 à 8 centimètres. Nous admettrons ces résultats pour les grilles des foyers.

403. La surface des grilles et l'épaisseur du combustible étant ainsi fixées, il reste à déterminer la résistance que l'air éprouve à traverser le foyer. Mais cette détermination par des considérations théoriques est impossible, car on ne connaît pas l'influence du passage de l'air à travers les intervalles des fragments du combustible, celle de l'échauffement subit de l'air par la combustion, et celle des jets de gaz combustibles qui se produisent pour certains combustibles, au moins pendant un certain temps; d'ailleurs, si ce calcul était possible, il serait sans aucune utilité, parce que l'état d'un foyer change à chaque instant. Ainsi on ne peut avoir une évaluation approximative de la résistance que présentent les foyers que par l'expérience.

404. En assimilant la résistance que l'air éprouve en traversant un foyer au frottement de l'air dans des tubes d'un petit diamètre, cette résistance pour chacun des petits conduits parcourus par l'air sera de la forme $mv^2$, $m$ étant un nombre constant pour le même état du canal,

et $v$ la vitesse d'écoulement de l'air à la partie supérieure de la cheminée; et la somme des résistances pourra être représentée par $Rv^2$, R étant un nombre à déterminer par l'expérience. Alors, en désignant par D le diamètre du sommet de la cheminée, par L la longueur d'un canal ayant le diamètre D qui produirait la même résistance que la totalité du circuit, excepté le foyer, on aura évidemment

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{KL}{D} v^2 + Rv^2; \quad \text{d'où} \quad v^2 = \frac{2gP}{1 + \frac{2gKL}{D} + 2gR.} \qquad (1)$$

405. Supposons maintenant qu'on calcule la vitesse d'écoulement de l'air à l'extrémité d'une cheminée, en partant de la consommation du combustible, du volume d'air nécessaire à la combustion, et de la température de l'air brûlé dans la cheminée, en mettant cette vitesse à la place de $v$ dans l'équation précédente, on en déduira la valeur de R.

En faisant ces calculs pour des cheminées de chaudières à vapeur ayant un bon tirage, et dans lesquelles l'effet utile produit ne permettait pas de douter que la combustion n'eût lieu dans des conditions favorables, et dont les grilles avaient des surfaces telles que la consommation de combustible par heure correspondait à peu près à 1 kilog. ou $1^k,2$ de houille par décimètre carré, j'ai trouvé à peu près $2gR = 12$.

406. D'après cela on peut facilement déterminer les dimensions les plus convenables d'une cheminée. En désignant par Q le poids du combustible à brûler par heure, par $n$ le volume d'air froid nécessaire à la combustion de chaque kilogramme de combustible, par $t$ la température de l'air chaud dans la cheminée, et enfin par A le volume d'air chaud qui doit s'écouler par seconde, on aura

$$A = \frac{Qn(1 + 0{,}00365\,t)}{3600},$$

en supposant carrée la section de la cheminée et en prenant pour K, 0,0025, on aura

$$A = vD^2; \quad \text{et} \quad v^2 = \frac{2gPD}{D + 0{,}05\,L + 12.D},$$

et par suite

$$D^5 = \frac{A^2(13\,D + 0{,}05\,L)}{2gP} \ldots \qquad (2)$$

Pour résoudre cette équation, on négligera d'abord le terme 0,05L; on

aura alors l'équation

$$D^4 = \frac{13A^2}{2gP}, \qquad (3)$$

dont on tirera facilement la valeur de D. On la substituera ensuite dans le second membre de l'équation (2). On aura une seconde valeur de D plus approchée que la première. En substituant cette dernière dans la même équation (2), on obtiendra une troisième valeur de D plus approchée encore que la seconde, et on pourra, en continuant le même mode de calcul, obtenir une approximation aussi grande qu'on pourra le désirer. Mais la seconde valeur ainsi obtenue est toujours suffisante. Il est évident qu'en s'arrêtant à une valeur quelconque de D, l'erreur que l'on commet est toujours inférieure à une unité de l'ordre du dernier chiffre commun à la dernière et à l'avant-dernière valeur de D.

407. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer le minimum de section d'une cheminée ayant 20 mètres de hauteur, dans laquelle l'air chaud se trouve à 300°, et qui doive appeler dans le foyer l'air nécessaire à la combustion de 50 kilog. de houille à l'heure, la longueur totale du circuit étant de 40 mètres, on aura $2gP = 19{,}62 \times 20 \times 0{,}00365 \times 300 = 441{,}45$; $A = 50 \times 18(1 + 0{,}00365 \times 300) : 3600 = 0{,}52$, et

$$D^5 = \frac{0{,}27\,(13\,D + 2)}{441{,}45}.$$

En négligeant 2 au numérateur du second membre de l'équation, on a $D^4 = 3{,}51 : 441{,}45$; et $D = 0{,}98$. En mettant cette valeur de D dans l'équation précédente, on trouve $D = 0{,}3235$; et ensuite $D = 0{,}3272$. Ainsi on voit que la seconde approximation était suffisante.

408. Lorsque le rapport de L à D est à peu près égal à 60, $2gKL : D = 3$, le dénominateur de l'expression (1) se réduit à 16, et la vitesse d'écoulement est égale à $\frac{1}{4}$ de la vitesse due à la hauteur; il est alors très-facile de calculer la section de la cheminée. Par exemple, en supposant la même hauteur à la cheminée que dans le cas précédent, la même température au bas de la cheminée, la vitesse d'écoulement sera égale à $\sqrt{441{,}45} : 4 = 5{,}25$, et on aurait $D^2 \times 5{,}25 = 0{,}52$, et $D = 0^m{,}31$.

Dans la supposition que $L : D = 60$, en désignant par Q le poids du combustible brûlé par décimètre carré de section de la cheminée et par heure; comme le volume d'air brûlé à 300° qui doit s'écouler pour cha-

que kilogramme de houille brûlé par heure est à peu près de 36 mètres cubes, on aura

$$\frac{1}{4} D^2 \sqrt{2gP}. \; 3600 = Q \; 36. \times 100. \; D^2 ; \text{ d'où } Q = 0{,}25 \sqrt{2gP}.$$

409. Lorsque la cheminée a 10, 20 et 30 mètres de hauteur, on trouve pour $\sqrt{2gP}$, 14,66; 20,73; et, 25,39; et pour les valeurs de Q, 3,66; 6,18, et 6,34.

410. Lorsque le rapport de L à D s'éloignera peu de 60, on pourra prendre ces nombres pour déterminer la section de la cheminée; c'est ce qui arrive en général pour les chaudières à vapeur. Mais il vaut mieux se servir de la règle générale qui est applicable à tous les cas.

411. Les dimensions des cheminées, calculées comme je viens de l'indiquer, s'accordent très-bien avec celles des cheminées des chaudières à vapeur qui produisent le plus d'effet utile, et dont les grilles brûlent de $1^k$ à $1^k,2$ de houille par décimètre carré et par heure. On rencontre des fourneaux dans lesquels les sections des cheminées sont plus petites; mais ces appareils produisent moins d'effet utile, tantôt parce que les grilles sont trop grandes et qu'il s'échappe beaucoup d'air et de gaz combustibles sans altération; d'autres fois, parce que les grilles sont trop petites et qu'il se forme beaucoup d'oxyde de carbone.

412. La même méthode de calcul s'applique encore d'une manière assez satisfaisante aux cheminées des fourneaux dont les foyers sont alimentés par le bois, quoique les grilles soient beaucoup moins obstruées que par l'emploi de la houille; mais ordinairement, pour des consommations équivalentes, les grilles à bois sont quatre fois plus petites que les grilles à houille.

413. Quoique les sections des cheminées déterminées par la méthode que je viens d'exposer soient toujours suffisantes pour produire l'effet demandé, du moins quand la surface de la grille a les dimensions convenables, il est toujours avantageux de donner à la cheminée une plus grande section, sans changer pourtant celle des carneaux. On donne ainsi à la cheminée un excès de puissance que l'on réduit à volonté à l'aide d'un registre, et qui peut être utile dans plusieurs circonstances; par exemple dans le cas où la nature du combustible employé exigerait qu'il fût traversé par un courant d'air animé d'une plus grande vitesse, et par conséquent qu'il fût brûlé sur une plus petite grille, ou que

sur la même grille la couche de combustible fût plus épaisse, et enfin dans le cas où, par une circonstance imprévue, il serait important d'augmenter l'effet produit par les fourneaux, et par conséquent la quantité de combustible consommé dans le même temps.

414. Pour toutes les chaudières à vapeur, excepté celles des locomotives, on arrive à des résultats suffisamment exacts, en supposant que tout le circuit du foyer au sommet de la cheminée ait la même section, et que, partout, la résistance soit la même que si le canal avait une section carrée ou circulaire, et en n'ayant aucun égard au rélargissement de la cheminée à sa partie inférieure. Les résultats du calcul s'accordent d'une manière satisfaisante avec l'expérience, parce qu'en général, la forme des carneaux, quand ils ont la section de la cheminée, n'augmente que très-peu leur résistance, et que cet accroissement est d'ailleurs compensé, au moins en partie, par la plus grande largeur de la cheminée dans une très-grande partie de sa hauteur, et enfin parce que le rélargissement de la cheminée à sa partie inférieure paraît être sans influence pour diminuer la vitesse d'écoulement. Mais cela n'arriverait certainement pas si la section des carneaux n'était pas partout la même, et si cette section était trop allongée; il faudrait alors avoir recours à la méthode générale que nous avons exposée d'abord.

415. Il résulte de tout ce que nous avons dit sur l'influence des grilles, que, dans un fourneau établi, on pourrait augmenter la quantité de combustible consommé en augmentant la surface de la grille; mais cet accroissement de consommation produirait, en général, peu d'effet utile, d'abord parce que l'air brûlé, passant avec trop de rapidité contre les surfaces qui doivent en absorber la chaleur, arriverait à la cheminée à une trop haute température, ensuite parce que la combustion étant beaucoup moins vive, une partie des gaz combustibles qui se dégagent ne serait pas brûlée, et enfin parce qu'une plus grande quantité d'air traverserait inutilement le foyer.

416. Dans la première édition de cet ouvrage, j'avais donné une autre méthode pour déterminer le minimum de section d'une cheminée : elle consistait à ne pas avoir égard à la résistance de la grille, mais à prendre pour le coefficient de frottement le nombre 0,012, au lieu de celui qui convient aux surfaces enduites de noir de fumée et qui est cinq fois plus petit. Cette méthode conduit à des résultats qui s'accordent bien

avec la pratique quand il s'agit de chaudières à vapeur; ils sont même identiques avec ceux qui résultent de la méthode générale exposée (406), quand le rapport de la longueur du circuit au diamètre du canal est égal à 60. Mais, pour des circuits plus longs, elle donne des sections trop grandes, et dans le cas contraire des sections trop petites. La nouvelle méthode qui sépare l'influence de la grille de celle des carneaux, a l'avantage de s'appliquer à tous les cas et de donner des résultats qui s'accordent d'une manière très-satisfaisante avec ce qui se pratique ordinairement.

417. Tout ce qui précède suppose que les grilles ont des dimensions telles que la quantité de houille brûlée par décimètre carré et par heure soit à peu près de $1^k$ à $1^k,2$, et que l'épaisseur de la couche de combustible soit environ de 7 à 8 centimètres. Ce sont les circonstances qui paraissent avoir été reconnues les plus avantageuses par l'expérience pour les foyers des chaudières à vapeur, où il est important de produire une bonne combustion et d'avoir une surface rayonnante d'une grande étendue. Mais, dans d'autres circonstances, il peut être utile de brûler le combustible sur des grilles plus grandes ou plus petites : dans le premier cas, pour avoir encore une plus grande surface rayonnante; dans le second, pour en avoir une plus petite et pour donner à l'air brûlé une plus haute température.

Lorsqu'on emploie des combustibles qui brûlent avec flamme, il est impossible de prévoir ce qui arriverait, sous le rapport de l'effet utile produit, si on se servait de grilles ayant des surfaces beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que celles qui sont généralement usitées. Mais il n'en est pas ainsi pour les combustibles qui brûlent sans flamme, et on conçoit facilement qu'on pourrait obtenir une bonne combustion dans des foyers dont les dimensions différeraient beaucoup de celles des foyers des chaudières à vapeur, si le tirage de la cheminée était convenable. Je ne connais point d'expériences sur les foyers à grilles de différentes grandeurs traversés par le même volume d'air, mais je pense qu'on peut admettre, sans crainte de s'écarter beaucoup de la réalité, que, pour le même combustible, les résistances sont proportionnelles à l'épaisseur de la couche de combustible, et en raison inverse de l'étendue de la grille.

418. D'après ce que nous avons dit dans le chapitre précédent sur l'influence du rélargissement des cheminées, on conçoit facilement qu'en

donnant à une cheminée une hauteur et une largeur convenables, on pourrait toujours brûler dans un foyer donné une quantité de combustible également donnée, surtout si le rélargissement de la cheminée avait lieu d'une manière lente et continue; car on pourrait produire une vitesse quelconque dans l'orifice inférieur. Il y a cependant une limite, parce que la hauteur d'une cheminée ne pourrait pas dépasser 30 à 40 mètres sans de grandes dépenses de construction, et que sa largeur doit toujours être très-petite relativement à sa hauteur, afin que l'écoulement ait lieu à plein tuyau. Mais dans ces limites il y a souvent un très-grand avantage à employer des cheminées très-hautes et très-larges qui reçoivent l'air brûlé à une température peu élevée. En examinant les différents appareils de chauffage, nous verrons les circonstances dans lesquelles ces dispositions pourraient être utiles, et les dimensions qu'il faudrait alors donner aux cheminées.

419. *Différentes méthodes qui ont été proposées pour calculer la section des cheminées.* Montgolfier est le premier physicien qui se soit occupé de la détermination de la section d'une cheminée, en partant de sa hauteur, du volume d'air nécessaire à la combustion, et de la température de l'air brûlé; mais il n'avait eu égard ni au frottement de l'air contre les parois du canal, ni à la résistance que présentent les grilles.

Alors, en représentant par A le volume d'air chaud qui devait sortir par seconde de la cheminée, et par D le diamètre de la cheminée supposée carrée, on avait

$$D^2 = \frac{A}{\sqrt{Hat}}.$$

420. Clément, dans son cours au Conservatoire, donnait la méthode de Montgolfier; mais il disait qu'il fallait supposer la vitesse d'écoulement de l'air cinq fois plus petite, ce qui revient à

$$D^2 = \frac{5A}{\sqrt{Hat}}.$$

421. La méthode de Montgolfier donne évidemment des résultats trop petits; celle de Clément donne des diamètres trop grands, mais qui se rapprochent assez de ceux qu'on emploie pour les chaudières à vapeur.

422. Tredgold, dans son traité des machines à vapeur, donne une méthode très-simple pour trouver la section d'une cheminée d'une chaudière à vapeur; elle consiste, pour une machine à basse pression dont

la puissance excède dix chevaux, à diviser quatre fois la force de la machine en chevaux par la racine carrée de la hauteur de la cheminée; on obtient ainsi la section en décimètres carrés; et comme il admet qu'un cheval-vapeur consomme 5 kilogrammes de houille à l'heure, la recette revient à diviser les $\frac{4}{5}$ du nombre de kilogrammes de houille à consommer par heure, par la racine carrée de la hauteur de la cheminée. Pour les cheminées à haute pression, la fraction $\frac{4}{5}$ doit être remplacée par $\frac{1}{5}$; et dans tous les cas il conseille de doubler la section. Il applique ses calculs à une chaudière de 40 chevaux, et trouve pour la section 36 décimètres carrés, et il propose de la doubler en la portant à 72. Cette section est alors à peu près celle qu'on emploie.

Pour apprécier la méthode de Tredgold, il faut examiner les calculs qu'il a faits pour y arriver. Dans le même ouvrage, page 176, on voit qu'il calcule la section d'une cheminée en divisant le volume d'air qui doit s'écouler dans une seconde, par la vitesse obtenue, sans avoir égard aux frottements; seulement, il multiplie cette vitesse par le coefficient 0,65 qui convient à l'écoulement de l'air par un orifice percé dans une paroi épaisse, et il suppose que la température de la fumée dans la cheminée est égale à celle de la vapeur, c'est-à-dire, de 105° pour les chaudières à basse pression.

423. D'après M. Darcet, les cheminées doivent avoir 10 mètres de hauteur; une section telle que chaque décimètre carré corresponde à une consommation de houille de 3,0 à 3$^k$,3 par heure, et la surface de la grille doit être trois fois plus grande que la section de la cheminée. Ces résultats se rapprochent beaucoup de ceux que nous avons indiqués (409).

424. *Cheminées communes à plusieurs fourneaux.* Dans la plupart des grandes usines, on ne construit qu'une seule cheminée pour tous les fourneaux; on y trouve deux avantages : 1° une économie dans les frais de construction; 2° une uniformité de tirage qui n'existe point dans une cheminée qui ne correspond qu'à un seul foyer. L'économie est évidente, car une seule cheminée coûte moins de construction que plusieurs, en supposant même la section de la cheminée unique égale à la somme des sections des autres. Quant au second avantage, il faut remarquer que, dans un fourneau ayant une cheminée spéciale, le tirage est très-variable; il est faible au commencement de la charge, il s'élève à mesure que

la combustion devient plus active, et s'affaiblit ensuite; mais il diminue surtout par l'ouverture des portes du foyer. Mais si plusieurs fourneaux communiquent avec une cheminée commune, et si on a soin de ne charger les foyers que successivement, il s'établira dans la cheminée un tirage moyen qui sera d'autant plus régulier que les fourneaux seront plus nombreux.

On peut encore ajouter au nombre des avantages que présentent les cheminées communes, celui de produire un plus faible refroidissement de la fumée, et par conséquent de produire un plus grand tirage quand la température de la fumée qui y pénètre est au-dessous de celle qui correspond au maximum d'effet.

425. On donne ordinairement pour section à une cheminée commune la somme des sections des cheminées partielles qui correspondraient à chaque fourneau. La section ainsi obtenue est certainement trop grande, parce que la résistance est beaucoup plus petite que la somme des résistances dans les cheminées partielles qu'elle remplace. Mais cet excès de tirage, qu'on peut toujours modérer à volonté, ne présente aucun inconvénient.

Il serait difficile de calculer les dimensions d'une cheminée commune avec la condition qu'elle produisît exactement le tirage demandé, et en outre ces calculs seraient sans utilité, car il faut toujours, comme nous l'avons déjà dit, qu'une cheminée ait un grand excès de tirage; la méthode simple généralement employée conduit à ce résultat, et sans pourtant que la cheminée ait une section qui dépasse beaucoup celle qui serait rigoureusement nécessaire.

### § 2. — CHALEUR PERDUE PAR L'AIR BRULÉ.

426. La quantité de chaleur perdue par les cheminées est en général très-considérable, car l'air brûlé est presque toujours abandonné à une température élevée : dans les fourneaux de chaudières à vapeur, cette perte excède le quart de la quantité totale de chaleur produite par le combustible consommé. Dans tous les cas, la quantité de chaleur perdue par les cheminées varie avec la température de l'air brûlé, avec le volume d'air qui pénètre dans le foyer et avec le volume de vapeur produite.

427. La détermination de la valeur de cette perte ne présente aucune difficulté. Prenons, par exemple, un foyer à houille : nous avons vu qu'un kilogramme de houille moyenne peut développer 7500 unités de chaleur, c'est-à-dire, que la chaleur développée peut élever 7500 kilogrammes d'eau de 1°, et que ce poids de combustible exige 18,44 mètres cubes d'air, ou plutôt que la combustion fournit à peu près 18,44 mètres cubes de mélange de gaz et de vapeurs, à la température ordinaire, dont la densité diffère peu de celle de l'air. En admettant, de plus, que la chaleur spécifique de ce mélange soit égale à celle de l'air, et que toute la chaleur développée soit entraînée par ces gaz, cherchons la température qu'ils prendront. Or, nous savons que l'air a une chaleur spécifique quatre fois plus petite que celle de l'eau ; par conséquent, 1 kilog. de houille pourra élever 1 kilogramme d'air à une température de $7500 \times 4 = 30000°$ ; mais si la chaleur est reçue dans 18,44 mètres cubes d'air dont le poids égale $18,44 \times 1,3 = 24$ kilogrammes, il est évident que la température de cet air sera $\frac{30000}{24} = 1250$.

D'après cela, si la fumée s'échappe à 100°, 200° 300°, les pertes seront

$$\frac{100}{1250} = 0,080; \quad \frac{200}{1250} = 0,160; \quad \frac{300}{1250} = 0,240.$$

Elles seraient évidemment deux, trois, quatre fois plus grandes s'il passait deux, trois, quatre fois plus d'air à travers le combustible.

428. Des calculs analogues sur les différents combustibles conduisent aux résultats suivants :

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | PUISSANCES calorifiques. | VOLUME de gaz et de vapeur produits. | TEMPÉRATURE de la fumée. |
|---|---|---|---|
| | | m. c. | |
| Bois parfaitement desséché..... | 3600 | 7,34 | 1509° |
| Bois ordinaire à 20 pour cent d'eau.. | 2800 | 6,11 | 1400 |
| Houille moyenne..... | 7500 | 18,43 | 1250 |
| Coke à 15 pour cent de cendres..... | 6000 | 15,00 | 1230 |
| Tourbe complétement desséchée..... | 4800 | 11,73 | 1263 |
| Tourbe ordinaire à 20 pour cent d'eau. | 3600 | 9,65 | 1152 |
| Charbon de bois..... | 7000 | 16,40 | 1313 |

*Perte de chaleur par une cheminée, le foyer étant alimenté par de la houille, la quantité totale de chaleur développée étant représentée par* 1, *et la température de l'air étant à* 0°.

| TEMPÉRAT. à l'origine de la cheminée. | L'AIR étant totalement brûlé. | L'AIR étant brûlé à moitié. | L'AIR étant brûlé au tiers. | L'AIR étant brûlé au quart. | L'AIR étant brûlé au cinquième. | L'AIR étant brûlé au sixième. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 0,021 | 0,043 | 0,063 | 0,086 | 0,105 | 0,126 |
| 100 | 0,043 | 0,086 | 0,126 | 0,172 | 0,210 | 0,252 |
| 150 | 0,063 | 0,129 | 0,189 | 0,258 | 0,315 | 0,378 |
| 200 | 0,086 | 0,172 | 0,252 | 0,344 | 0,420 | 0,504 |
| 250 | 0,105 | 0,215 | 0,315 | 0,430 | 0,525 | 0,630 |
| 300 | 0,129 | 0,248 | 0,378 | 0,516 | 0,630 | 0,756 |
| 350 | 0,147 | 0,331 | 0,441 | 0,602 | 0,735 | 0,882 |
| 400 | 0,172 | 0,344 | 0,504 | 0,688 | 0,840 | » |
| 440 | 0,189 | 0,387 | 0,567 | 0,774 | 0,945 | » |
| 500 | 0,215 | 0,430 | 0,630 | 0,86 | » | » |

429. On voit d'après cela combien il est important de ne faire passer à travers le combustible que la quantité d'air seulement nécessaire à la combustion. Mais si on n'en laissait passer qu'une quantité insuffisante, ou même si on voulait approcher trop près de la limite, une partie du charbon se transformerait en oxyde de carbone, et cette circonstance occasionnerait une grande perte de chaleur, car 1 kilog. de charbon qui se transforme en acide carbonique produit 7170 unités de chaleur, quantité qui se réduit à 1386 quand le produit de la combustion est de l'oxyde de carbone (271).

### § 3. — CONSTRUCTION DES CHEMINÉES.

430. Toutes les dimensions des cheminées pouvant être déterminées par les considérations qui précèdent, il ne nous reste plus qu'à examiner la nature des matériaux, les épaisseurs et les dispositions les plus favorables. C'est ce que nous allons faire, en considérant successivement les cheminées d'usines et les cheminées d'habitation.

*Cheminées d'usines.*

431. Quand les cheminées sont destinées à des fourneaux, elles sont promptement tapissées de suie; alors, de quelque nature qu'elles soient, elles produisent la même résistance dans les mêmes circonstances, et par conséquent, elles se comportent de la même manière. Il ne pourrait y avoir de différence entre le tirage des cheminées métalliques et le tirage des cheminées en briques, que celle qui résulte de l'inégal refroidissement de l'air brûlé dans ces différentes espèces de cheminées, mais l'influence de ce refroidissement est très-faible (383).

432. Mais si les cheminées étaient destinées à évacuer de l'air ou des gaz qui ne contiendraient pas de fumée, il y aurait de l'avantage à employer des cheminées métalliques, du moins dans les mêmes circonstances et pour la même pression, elles débiteraient plus d'air; mais elles coûteraient plus cher, de sorte que généralement et dans presque tous les cas on préfère les conduits en poterie, en briques ou en plâtre.

433. Pendant quelques années on a construit des cheminées isolées en cuivre, mais on y a renoncé, parce que ce métal s'altère rapidement à l'extrémité supérieure de la cheminée, du moins quand on emploie la houille pour combustible. Une cheminée en cuivre établie dans une raffinerie était déjà très-altérée après 18 mois de service. Il paraît que les gaz qui se dégagent n'agissent pas sur le cuivre à une haute température, c'est ce qui est d'ailleurs démontré par le long usage des chaudières à vapeur en cuivre, et que l'action est au contraire très-énergique à une température peu élevée. On ne connaît pas la cause de ce fait singulier.

On construit encore des cheminées en tôle, mais de petite dimension, et on les enduit extérieurement d'une couche de chaux pour les préserver de l'oxydation.

434. Quant à la forme de la section, il est évident, d'après ce qui précède, que la plus convenable est celle qui, pour une surface donnée, a le minimum de contour; c'est par conséquent la forme circulaire, et ensuite, les formes polygonales d'un grand nombre de côtés. On donne toujours la forme circulaire aux sections des cheminées métalliques, et à celles qui sont en poteries; mais les cheminées qui sont en briques ont ordinairement pour section un carré ou un rectangle, parce que les cheminées de cette forme sont plus faciles à construire. On fait aussi

des cheminées en briques cylindriques ou coniques; mais l'avantage qu'elles présentent se trouve bien compensé par le prix de la main-d'œuvre.

435. Examinons maintenant la forme de la section verticale qui passe par l'axe. Quand les cheminées n'ont qu'une petite hauteur, on les fait prismatiques intérieurement, en donnant aux murailles une épaisseur plus grande au bas qu'au sommet (fig. 6 et 7, pl. 2). Mais quand les cheminées doivent avoir une grande hauteur, on leur donne toujours une forme pyramidale en dedans et en dehors (fig. 8, 9 et 10, pl. 2), afin qu'elles résistent à l'action des vents. Il est impossible de calculer les pentes intérieures et extérieures, parce que le calcul devrait reposer sur un trop grand nombre d'éléments inconnus, tels que le maximum d'action des vents, la force de liaison des matériaux, l'élasticité de l'ensemble. Nous nous contenterons de rapporter les pentes qui ont été reconnues suffisantes par l'expérience.

436. Dans les grandes cheminées d'usine, la pente intérieure par mètre courant est d'environ $0^m,015$ à 0,018; et la pente extérieure varie de $0^m,024$ à 0,030. L'épaisseur de la maçonnerie au sommet est de 0,10, la largeur d'une brique ordinaire. D'après cela, si on désigne par $d$ le diamètre intérieur du sommet d'une cheminée, par $d'$ son diamètre extérieur, et par D et D' les diamètres intérieur et extérieur, au bas de la cheminée, on aura

$$D = d + 2Hm; \quad \text{et} \quad D' = (d + 0{,}20) + 2Hm',$$

$m$ étant compris entre 0,015 et 0,018; et $m'$ entre 0,024 et 0,030.

Supposons, par exemple, une cheminée de 20 mètres de hauteur et de 0,60 de diamètre intérieur au sommet, le diamètre intérieur D au bas sera, en prenant $m = 0{,}018$, de $1^m,32$; le diamètre extérieur $d'$ au sommet sera de $0{,}60 + 0{,}20 = 0^m,80$; et le diamètre extérieur en bas, en prenant $m' = 0{,}03$, sera de $2^m$.

On peut alors facilement tracer le profil de la cheminée dans chaque cas particulier.

La cheminée de la manufacture des tabacs de Paris, qui est destinée à brûler 700 kilogrammes de houille à l'heure, ce qui correspond à près de 150 chevaux, a 29 mètres de hauteur, intérieurement $1^m,03$ de diamètre au sommet, $2^m,15$ à la base, et extérieurement au sommet $1^m,30$, et à la base $3^m,45$. Les deux pentes sont un peu trop fortes.

437. Si on voulait construire des surfaces coniques intérieures et extérieures, l'exécution serait assez difficile, et on serait obligé d'entamer beaucoup de briques, ce qui exigerait une main-d'œuvre coûteuse; d'ailleurs, les briques résistent beaucoup moins quand elles sont cassées que quand elles sont entières, parce que leur croûte extérieure a une bien plus grande ténacité que les parties intérieures.

On pourrait construire les cheminées coniques ou prismatiques par une suite de cylindres ou de prismes, qui produiraient des retraits brusques à l'intérieur et à l'extérieur; mais on préfère la disposition représentée (fig 9, pl. 2). La cheminée est conique ou pyramidale à l'extérieur, et l'épaisseur de la maçonnerie varie par sauts brusques; ordinairement les retraits ont lieu par 10 centimètres.

438. Les cheminées en briques ont des formes extérieures très-variées. La figure 11, (pl. 2), représente une cheminée anglaise; les figures 12, 13 et 14, (pl. 2), représentent des extrémités de cheminées de différentes formes. La figure 15 est une cheminée ayant la forme d'un obélisque. La figure 16 représente sur une plus grande échelle la partie supérieure; elle est formée d'une plaque de fonte horizontale (figure 17) sur laquelle sont placées, verticalement et diagonalement, deux plaques de fonte (fig. 18 et 19) qui se pénètrent mutuellement. On donne ordinairement à ces cheminées les proportions de l'obélisque de Louqsor. Les dimensions de cet obélisque sont : hauteur $20^m,90$, largeur en bas $2^m,423$, largeur en haut $1^m,54$, hauteur du chapiteau $1^m,94$.

439. Si, dans les tuyaux de conduite, les gaz se comportaient exactement comme les liquides, il y aurait un grand inconvénient à augmenter la section des cheminées à leur partie inférieure, car ce rélargissement occasionnerait une grande perte de hauteur motrice; il en serait de même des variations brusques de section. Mais ces circonstances ne paraissent avoir que peu d'influence. Cependant il serait plus convenable de donner à la surface intérieure la forme d'un cylindre, et de faire porter toute la pente sur la surface extérieure.

440. Les cheminées en briques sont ordinairement montées sur des socles prismatiques percés de deux ouvertures opposées : l'une est destinée à recevoir le canal qui doit amener la fumée dans la cheminée; l'autre, qui est ordinairement fermée par une porte en fer ou par des briques réunies par de la terre crue, sert à introduire de temps en temps

dans la cheminée l'ouvrier qui doit la nettoyer. Pour cet objet, la cheminée est garnie dans un des angles de barres de fer horizontales espacées de 0,80, et qui forment une échelle au moyen de laquelle on s'élève facilement jusqu'au sommet.

441. Il est bien important de n'établir une cheminée que sur des fondations bien solides et qui ne cèdent pas sous son poids, car l'affaissement se fait toujours inégalement; et, quand il a lieu, il en résulte sinon la chute de la cheminée, au moins une déviation nuisible et dangereuse. C'est un point auquel les constructeurs n'attachent pas en général assez d'importance. En Belgique, par exemple, il est rare de trouver une cheminée verticale.

442. Dans les cheminées qui doivent recevoir de l'air à une température très-élevée, comme celles des fourneaux à réverbère, il faut employer des briques réfractaires et les lier entre elles avec de la terre à briques. Dans les cheminées qui, comme celles des chaudières à vapeur, ne doivent recevoir que des fumées à une température rarement supérieure à 300°, on peut employer des briques ordinaires réunies par du mortier de chaux et de sable siliceux; il serait cependant utile d'employer des briques réfractaires pour le revêtement de la partie intérieure du bas de la cheminée. Le plâtre ne doit jamais être employé quand la température de la fumée doit dépasser 100°, parce qu'à cette température le plâtre commence à perdre l'eau hygrométrique qu'il renferme, et par suite sa ténacité.

443. Les grandes cheminées isolées peuvent se construire sans échafaudage extérieur quand leur diamètre est assez grand; l'ouvrier s'élève progressivement sur des étais qu'il place dans des cavités qu'il ménage. Un bon ouvrier habitué à ces sortes de constructions, aidé d'un garçon qui lui donne les briques et le mortier, peut élever ainsi en quinze jours une cheminée rectangulaire pyramidale de 13 à 14 mètres de hauteur, de $2^m$ et $1^m$ de diamètre extérieur et intérieur à sa base, et de 0,80 et 0,60 de diamètres extérieur et intérieur au sommet.

444. Les cheminées sont ordinairement terminées par une partie d'un plus grand diamètre, et qui ressemble au chapiteau d'une colonne; cette partie de la cheminée est principalement destinée à lui donner une forme plus élégante. Souvent le chapiteau est en briques (fig. 20, pl. 2) comme le reste de la cheminée; d'autres fois il est formé d'une seule

pierre; d'autres fois, enfin, il est en fonte ou en fer (fig. 21 et 22, pl. 2).

Les chapiteaux en briques ont l'inconvénient de laisser pénétrer les eaux pluviales à travers la maçonnerie et d'en faciliter la détérioration; tous les autres n'ont pas cet inconvénient. Mais ceux qui sont en fonte ont celui d'augmenter par leur poids l'amplitude des oscillations que fait la cheminée par l'influence des vents. La meilleure disposition consiste dans l'emploi d'un chapiteau en briques recouvert d'une épaisse feuille de tôle qui s'étend sur toute sa partie horizontale, et qui se replie de 0,10 à 0,15 en dedans et en dehors.

445. Les cheminées d'usines isolées et très-élevées provoquent la chute de la foudre et par leur élévation et par la grande conductibilité de la suie qui recouvre leur surface intérieure; aussi les arme-t-on d'un paratonnerre. Les figures 23 et 24 (pl. 2) représentent les dispositions généralement employées. Dans la première, quatre tiges rivées au chapeau de tôle qui enveloppe le chapiteau, supportent la tige du paratonnerre, une des tiges se prolonge horizontalement et se termine par un anneau auquel est attachée la corde métallique dont l'autre extrémité plonge au-dessous des plus basses eaux d'un puits. La seconde représente un paratonnerre d'une cheminée en tôle. La tige du paratonnerre est supportée par deux tiges rivées sur les bords de la cheminée qui sert elle-même de conducteur, et la chaîne destinée à établir la communication avec un puits, peut être fixée à sa partie inférieure.

446. Quand les cheminées isolées sont minces et très-élevées, il est nécessaire de les armer pour augmenter leur résistance. Le meilleur mode d'armature consiste à placer dans les assises des bandes de fer plat, recourbées par les deux bouts de la hauteur d'une ou deux briques, et qui se croisent alternativement, comme l'indiquent les figures 25 et 26 (pl. 2).

447. Les figures de la planche 3 représentent les élévations et les coupes de plusieurs cheminées en briques et en tôle qui ont été construites et qui n'ont éprouvé aucun accident.

Les figures 1 et 2 représentent l'élévation et la coupe verticale d'une cheminée conique; les figures 3 et 4 les coupes horizontales par les plans *ab* et *cd*. L'orifice *m* donne accès à la fumée; l'orifice *n*, ordinairement fermé, sert à introduire un ouvrier dans la cheminée pour la ramoner.

448. Les figures 5 et 6 représentent la coupe verticale et l'élévation à des échelles différentes d'une cheminée en tôle de 20 mètres de hauteur. La cheminée est fixée par des écrous ou seulement des rivets à un socle en fonte *abcd*, fixé lui-même sur un massif de maçonnerie au moyen de quatre tiges qui traversent le massif et qui sont terminées par des écrous. Lorsque ces sortes de cheminées sont très-élevées, on les maintient souvent par des haubans en fils de fer amarrés dans le sol ou dans des constructions voisines. Pour s'opposer à l'oxydation du métal, on recouvre la cheminée d'une couche de goudron de houille, substance qui supporte une température assez élevée sans s'altérer, ou mieux d'une couche de chaux. Si la cheminée ne devait pas recevoir de l'air à une température élevée, il serait bien préférable d'employer la tôle recouverte de zinc, ou d'une couche de peinture faite avec l'alliage pulvérulent de fer et de zinc.

449. Les figures 7 et 8 représentent l'élévation et la coupe verticale d'une grande cheminée en briques carrée; la figure 9 représente la projection horizontale du chapeau en fonte qui la termine; les figures 10 et 11 sont des coupes horizontales faites par les plans *ab* et *cd*.

450. *Disposition des carneaux.* Dans les grandes usines où l'on emploie des cheminées communes à plusieurs fourneaux, il est important de disposer le canal qui doit recevoir l'air brûlé de tous les fourneaux, de manière que les veines de gaz n'agissent pas les unes sur les autres. La figure 1 (pl. 4) représente la disposition qu'il faudrait employer lorsque l'air brûlé des différents fourneaux déboucherait à différentes distances dans un canal commun qui communiquerait avec la cheminée. La figure 2 (pl. 4) est relative au cas où les canaux partiels déboucheraient au même point d'un canal commun; et enfin la figure 3 représente la disposition qu'il faudrait employer dans le cas où trois canaux d'air brûlé pénétreraient dans une cheminée par trois faces différentes. Il est évident que, dans tous les cas, les diaphragmes doivent être placés de manière à laisser à chaque courant la section qui lui convient.

451. Il faut aussi éviter avec soin les rélargissements et les étranglements, parce que ces deux circonstances diminuent toujours l'effet produit par la cheminée, quoique leur influence soit beaucoup moindre que dans les conduites d'eau.

452. *Registres.* Dans tous les appareils de chauffage, quelles que soient

d'ailleurs leurs dimensions et leurs destinations, il est toujours nécessaire de placer au bas ou au sommet des cheminées une plaque de tôle ou de fonte au moyen de laquelle on puisse, à volonté, diminuer le tirage, et que l'on ferme pour éteindre le foyer. Les registres sont très-utiles dans les appareils qui ne fonctionnent que par intermittence; parce que, le courant d'air étant intercepté, le fourneau se refroidit très-lentement.

453. On peut les disposer d'un grand nombre de manières différentes. Dans les appareils d'une petite dimension dont les cheminées sont en tôle ou en fonte, on règle l'ouverture de la cheminée par une plaque circulaire *abcd* (fig. 4 et 5, pl. 4) mobile autour de l'axe *ab*, qui traverse les parois opposées du tuyau et que l'on fait mouvoir par la clef extérieure *mn*.

454. Cette disposition pourrait également être employée dans les appareils d'une grande dimension; mais comme le frottement seul de l'axe contre les tourillons qui le supportent ne serait pas suffisant pour maintenir la plaque dans sa position, il faudrait fixer à l'axe, et en dehors de la cheminée, une tige perpendiculaire à sa direction, percée à son extrémité d'un trou par lequel on ferait passer une clavette qui pénétrerait dans une série de trous disposés circulairement dans une plaque de fonte fixée contre la cheminée (fig. 6 et 7, pl. 4); la plaque mobile devrait être en fonte, parce que la tôle serait bientôt oxydée, et même, si cette dernière n'avait pas une grande épaisseur, elle serait sujette à se voiler, surtout si la température de la fumée était très-élevée.

455. On emploie quelquefois des trappes glissantes, horizontales (fig. 8 et 9). Mais, dans les grands appareils, on préfère celles qui se meuvent verticalement et qui sont soutenues par un contre-poids. La figure 10 (pl. 4) est une coupe de l'appareil suivant la longueur du canal, et la figure 11 une coupe en travers. *ab*, plaque en fonte; *cdef*, coulisse en fonte fixée dans la maçonnerie; *gg*, chaîne de suspension de la plaque; M, poulie de renvoi; P, contre-poids de la plaque. Ce contre-poids doit avoir un poids égal à celui de la plaque; le frottement de la poulie est alors suffisant pour maintenir la plaque à la hauteur à laquelle elle est abandonnée.

456. Cette dernière disposition est généralement employée; elle a cependant un grand inconvénient provenant de ce qu'il existe toujours un intervalle assez considérable entre les bords de la plaque et les rainures

du cadre en fonte dans lequel elle se meut; d'où il résulte qu'une grande quantité d'air froid est appelée dans la cheminée, et diminue d'une manière notable le tirage du foyer. La disposition indiquée dans les figures 12 et 13 (pl. 4) éviterait complétement cet inconvénient. Le registre est formé par une plaque verticale mobile autour d'un axe vertical; on pourrait le faire battre contre des arrêts en fonte qui permettraient une fermeture complète.

457. Quand la température de l'air chaud dépasse 5 à 600°, on ne peut pas employer les appareils que nous venons de décrire, parce que la fonte et le fer seraient trop promptement déformés ou oxydés. La meilleure méthode de régler le tirage de la cheminée est alors de placer la plaque mobile à l'orifice supérieur de la cheminée; parce que la plaque, étant toujours refroidie d'un côté par l'air, s'échauffe peu. La figure 14 (pl. 4) représente cette disposition; *ab* est une plaque de fonte soutenue par une tige verticale *cd*, fixée à genoux, à l'extrémité du levier *efg*, mobile autour du point *f;* l'extrémité *e* reçoit une chaîne *mn*, au moyen de laquelle on règle la distance de la plaque *ab* à l'orifice de la cheminée. Cette disposition a l'inconvénient d'exiger qu'un ouvrier monte au sommet de la cheminée quand la bascule vient à se déranger.

458. Il résulte de ce que nous avons dit dans le chapitre précédent, que les diaphragmes destinés à arrêter la circulation de l'air dans une cheminée sont beaucoup plus efficaces quand ils sont placés à la partie supérieure de la cheminée que quand ils traversent les canaux qui amènent l'air brûlé dans la cheminée, du moins quand la somme des surfaces des petits orifices qui restent ouverts sur leurs contours reste la même.

### *Cheminées d'habitations.*

459. Les dimensions des cheminées d'habitations ont été fixées par deux ordonnances de 1712 et de 1723. Elles étaient dans œuvre, pour les appartements, de 3 pieds de largeur sur 10 pouces de profondeur; et pour les cuisines des grandes maisons, de 4 pieds et demi à 5 pieds, sur 10 pouces de large. Elles devaient être construites en briques, avec des fantons en fer de distance en distance.

460. Ces dimensions excessives avaient de grands inconvénients; car, indépendamment de la place inutilement occupée par le tuyau de cheminée, la grande section du canal et sa forme aplatie étaient très-favorables à l'établissement des doubles courants, et par suite à l'introduction de la fumée dans les pièces. Depuis, on y a remédié en rétrécissant la cheminée aux deux extrémités ou dans une partie de leur longueur par les ventouses, ce qui produit le même effet qu'une diminution de diamètre dans toute l'étendue du canal. Ainsi, sous ce rapport, les ordonnances ne sont point exécutées; elles ne le sont pas davantage sous celui de la construction, car la plupart des cheminées sont en plâtre. Ainsi ces ordonnances de police sont complétement tombées en désuétude.

461. Quand on compare les dimensions des tuyaux de poêle avec celles des tuyaux de cheminée, et qu'on remarque que dans les gros poêles, on brûle souvent beaucoup plus de combustible que dans les cheminées, on est étonné qu'on ait laissé si longtemps entre eux une si grande disproportion. A la vérité, pour la même quantité de combustible à brûler dans le même temps, les tuyaux de cheminée doivent être plus grands que ceux des poêles, parce que, par la disposition des foyers, les cheminées appellent un grand volume d'air qui n'alimente pas la combustion; mais, en ayant égard à cette circonstance, la disproportion est encore énorme. L'habitude prise de faire ramoner les cheminées par des enfants qui les parcourent dans toute leur longueur, est probablement la cause qui a fait conserver aux cheminées des dimensions inutiles; mais, comme on peut facilement employer des moyens beaucoup plus simples pour ramoner les cheminées, comme nous le verrons plus bas, il est très-avantageux de ne leur donner que les dimensions seulement suffisantes au dégagement de la fumée et à la ventilation. La forme circulaire est toujours préférable à toutes les autres formes, parce que la résistance étant uniforme sur toute la surface intérieure, les doubles courants s'y établissent beaucoup moins facilement que dans les tuyaux carrés, et surtout dans ceux dont la largeur dépasse beaucoup la profondeur, parce que les résistances étant plus grandes dans les bouts, les courants descendants ont une plus grande facilité à se former. On a reconnu par expérience que, pour une cheminée d'appartement ordinaire, un tuyau circulaire de 15 à 20 centimètres de diamètre ou

de toute autre forme ayant 3 à 4 décimètres de surface, était presque toujours suffisant.

462. Le plâtre est peut-être de tous les matériaux qu'on puisse employer pour la construction des cheminées, celui qui présente les plus graves inconvénients, d'autant plus qu'on ne lui donne qu'une très-petite épaisseur, et qu'on en approche imprudemment les poutres; car, le plâtre est attaqué par l'eau qu'entraîne la fumée et par celle qui tombe de l'atmosphère, la chaleur lui fait éprouver un commencement de calcination qui détruit insensiblement l'adhérence de ses parties, et les variations de température occasionnent souvent des fentes par lesquelles la fumée peut se dégager.

On a été conduit à construire des cheminées d'habitation en plâtre, non-seulement parce que leur établissement coûtait moins qu'avec les briques, mais encore parce que le dévoyement des cheminées s'exécutait beaucoup plus facilement, et sans l'emploi d'armatures en fer.

L'usage du plâtre doit être proscrit dans la construction des cheminées; du moins il ne doit être employé que pour lier entre eux des matériaux plus résistants.

463. Les tuyaux de fonte employés pour les conduites de fumée ont aussi de graves inconvénients quand ils sont engagés dans la maçonnerie, à cause des dilatations et des contractions qui résultent des changements de température. On ne peut les employer utilement que pour des cheminées qui sont isolées ou adossées aux murs extérieurs.

464. Les cheminées en poteries ont en général trop peu d'épaisseur, et sont trop fragiles; elles ne doivent être encore employées que pour des conduits extérieurs.

465. La meilleure de toutes les constructions est celle en briques; et la manière la plus convenable de les disposer est celle qui a été imaginée par M. Gourlier : elle a été d'abord adoptée dans la construction du palais de la Bourse, et elle est maintenant généralement employée. Dans cette nouvelle disposition, les cheminées sont placées dans l'épaisseur des murailles dont elles n'augmentent pas l'épaisseur et dont elles ne diminuent pas la solidité; elles sont formées par des briques d'une plus grande épaisseur que les briques ordinaires, et qui ont des formes appropriées à la forme et aux dimensions du canal qu'elles doivent former. Les figu-

res 1, 2, 3 et 4 (pl. 5) représentent deux assises consécutives de briques destinées à former 1, 2, 4 ou 6 tuyaux de cheminée. La figure 5 représente une disposition dans laquelle les tuyaux ont une section rectangulaire arrondie sur les angles. La différence entre les formes des briques de deux assises qui se suivent, résulte de la nécessité de ne pas placer les joints des briques les uns sur les autres. Ce mode de construction présente une grande solidité; mais il a l'inconvénient d'exiger un grand nombre de modèles de briques, non-seulement à raison des différents diamètres des cheminées et du nombre des tuyaux groupés, mais pour chaque grandeur et chaque groupement.

466. Ces cheminées ne peuvent pas se ramoner par les procédés ordinaires; mais cette opération s'exécute bien plus facilement au moyen d'un fagot d'épines auquel on attache deux cordes de la longueur du canal, et au moyen desquelles on le promène facilement dans toute son étendue. Le mode de construction dont nous venons de parler est maintenant généralement adopté à Paris.

## § 4. — INFLUENCE DE L'ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE TIRAGE DES CHEMINÉES.

### *Influence des vents.*

467. Les vents ont, comme tout le monde sait, une très-grande influence sur le tirage des cheminées; leur action se manifeste souvent, et à l'orifice d'écoulement de l'air chaud, et à l'entrée de l'air froid, c'est-à-dire au sommet de la cheminée et à l'ouverture du cendrier ou du canal d'alimentation; c'est pourquoi nous examinerons successivement l'influence des vents aux deux extrémités du canal.

468. *Influence des vents à l'extrémité supérieure de la cheminée.* Pour étudier complétement cette question qui est importante, surtout quand le tirage est très-faible, il faut considérer l'influence du vent dans toutes les directions possibles.

469. Supposons d'abord que le vent soit perpendiculaire à la direction de la cheminée, et par conséquent qu'il soit horizontal. Lorsque le vent est dirigé horizontalement, il résulte de l'observation que la dépense n'est pas sensiblement changée; or, comme la veine est fortement inclinée, il faut alors nécessairement que l'augmentation de la vitesse d'écoulement compense la diminution de la section, du moins à peu près. On peut se rendre compte de cet effet en considérant la veine qui s'écoule comme possédant la vitesse verticale qui résulte de la force ascensionnelle due à la cheminée, et la vitesse horizontale du vent; on trouve alors qu'il y a compensation exacte. En effet, si *ab* (fig. 6, pl. 5) représente la vitesse verticale de la fumée, *ac* la vitesse du vent, *ad* sera la vitesse et la direction de la veine. *ap* et *pq* seront proportionnels à la section de la cheminée et à la section de la veine; et en désignant par $v$ la vitesse verticale, par V la vitesse *ad*, les dépenses seront proportionnelles à $ap \times v$ et à $pq \times V$. Or, on a $pq = ap \cos \varphi$, et $v = V \cos \varphi$; et par suite $v \times ap = V \times pq$.

470. Quand le vent est dirigé verticalement de haut en bas, l'effet produit dépend des vitesses relatives du vent et de l'air brûlé. Si les deux courants ont une vitesse égale, tous deux sont arrêtés; par conséquent, l'ascension de l'air dans la cheminée cesse complétement, et l'air brûlé qui se dégage continuellement du combustible reflue dans l'appartement; si, au contraire, le vent a une vitesse plus grande que celle de l'air brûlé, l'air extérieur s'introduira par le tuyau, et l'air brûlé qui se trouvait dans le canal, celui qui se dégage du combustible, ainsi que l'air extérieur, sortiront par la porte du foyer, et cela avec une vitesse d'autant plus grande, que celle du vent sera plus grande relativement à celle de l'air brûlé dans un air calme. Il est évident que si la vitesse du vent était plus petite que celle de l'air brûlé, la vitesse de ce dernier serait seulement ralentie.

471. Mais si on suppose que le vent soit dirigé de bas en haut, son influence sur la vitesse de dégagement de la fumée sera nulle toutes les fois que sa vitesse sera égale ou plus petite que celle de la fumée, et dans le cas contraire elle sera toujours favorable; alors le vent accélérera la vitesse d'écoulement de la fumée.

La cause de cette influence du vent dirigé de bas en haut est facile à reconnaître; en effet, toutes les fois qu'un courant d'air frappe un

obstacle *ab* (fig. 7, pl. 5), l'air qui se trouve derrière est en partie entraîné ; il se forme alors derrière l'obstacle un vide partiel, et un baromètre qui y serait placé descendrait d'une quantité notable ; cet effet étant indépendant de la forme et de l'épaisseur du corps que l'air vient choquer, on conçoit que si le corps avait la forme d'un cylindre, l'effet serait encore le même ; et si ce cylindre était creux et laissait échapper un courant d'air dans la direction du vent, le courant d'air chaud recevrait une accélération plus ou moins grande.

472. Les courants d'air ont rarement les directions que nous venons d'examiner, car ils ne sont presque jamais horizontaux ou verticaux, toujours ils ont une inclinaison plus ou moins grande à l'horizon ; mais on peut facilement ramener ce cas général à ceux que nous avons examinés d'abord ; car on peut considérer un courant incliné comme résultant de deux courants, l'un horizontal et l'autre vertical (fig. 8 et 9, pl. 5), et on peut facilement conclure de ce qui précède, que l'influence du vent pourra être favorable quand il tendra à s'élever, et qu'il sera toujours défavorable dans le cas contraire.

Les vents ayant, en général, des directions peu inclinées à l'horizon, leur influence est très-petite sur les cheminées élevées et isolées ; mais il n'en est plus ainsi lorsque les cheminées dépassent peu les toits des bâtiments, et quand elles sont dominées par des édifices ou des montagnes, parce que les courants d'air prennent la direction des surfaces qu'ils rencontrent, et qu'ils peuvent avoir alors des directions très-inclinées à l'horizon, ou dans un sens, ou dans l'autre. Le fait que nous venons d'énoncer, que les courants d'air qui rencontrent des surfaces immobiles en suivent la direction et ne se réfléchissent pas, résulte de l'expérience ; on peut facilement le constater en dirigeant le vent d'un soufflet obliquement contre une surface plane : le courant prend exactement la direction de la surface. Si le courant est lancé contre un cylindre perpendiculairement à sa direction et de manière que l'axe de la veine d'air et celui du cylindre soient dans un même plan, la veine d'air se divise en deux parties qui suivent les contours du cylindre et qui se réunissent sur le point du cylindre opposé à celui qui reçoit le choc de la veine.

473. Il résulte de ce qui précède, que la diminution de tirage des cheminées occasionnée par les vents est d'autant plus grande, que ce tirage est plus petit, que la vitesse du vent est plus considérable, et que sa di-

rection est plus inclinée à l'horizon de haut en bas (1). Mais on n'est pas toujours libre de donner à la fumée une vitesse suffisante pour qu'elle ne soit pas sensiblement modifiée par les vents dans les circonstances les plus ordinaires; car l'économie du combustible, et un grand nombre d'autres circonstances particulières, obligent souvent à ne laisser à la fumée qu'une faible vitesse; il est alors nécessaire d'armer les orifices supérieurs des cheminées de différents appareils destinés à détruire l'influence du vent, et même à l'utiliser pour le tirage. Nous donnerons une description succincte de ces appareils, après avoir examiné l'influence du vent sur l'autre extrémité de la cheminée, et celle des autres circonstances atmosphériques.

474. *Influence du vent sur les foyers.* Considérons le canal courbé à angle droit ABC (fig. 10, pl. 5), qui représente la disposition d'un foyer ordinaire avec sa cheminée. A est l'ouverture par laquelle entre l'air froid qui doit alimenter la combustion; C est celle de l'écoulement de la fumée.

Si nous supposons le canal rempli d'air froid à la température ordinaire, et un vent horizontal perpendiculaire à la direction du tuyau ABC, il est évident que l'air renfermé dans le canal n'éprouvera aucun mouvement. Mais si le courant est parallèle au tuyau AB, il déterminera un écoulement d'air par le canal ABC, dans le sens du mouvement de l'air extérieur; c'est-à-dire, que si le vent est dans la direction BA, l'air s'introduira par C et sortira en B; et si le vent est dirigé suivant AB, le courant entrera par A pour sortir en C.

475. Supposons maintenant que le canal soit rempli d'air chaud qui

---

(1) *Vitesse des vents.*

0m,5 (par seconde) vent à peine sensible.
1..... — sensible.
2..... — modéré.
5,5..... — assez fort.
10..... — fort.
20..... — très-fort.
22,5..... — tempête.
27..... — grande tempête.
36..... — ouragan.
45..... — ouragan qui déracine les arbres et renverse les édifices.

s'écoule par l'orifice C avec une certaine vitesse; il est évident que si le vent est dirigé suivant AB, et que sa vitesse soit plus grande que celle du courant d'air chaud, la vitesse de ce dernier sera accélérée; et qu'au contraire, si le vent se meut dans la direction BA, le courant d'air chaud sera toujours diminué. Ainsi, dans un appareil disposé comme l'indique la figure, le vent soufflant dans la direction AB, active le tirage, et le diminue lorsqu'il est dirigé en sens contraire.

C'est un phénomène que j'ai eu très-souvent l'occasion d'observer, principalement dans les fabriques de soude. Toutes les fois que le vent est dirigé en sens contraire du mouvement de l'air chaud dans les fourneaux, il y a toujours ralentissement du tirage. J'ai encore constaté ce fait dans un grand appareil de ventilation dont le tirage était très-faible, tirage qu'on était obligé de rendre tel, par économie, et qui était produit artificiellement par une combustion dans une cheminée d'appel; l'influence du vent était beaucoup plus considérable que dans les fourneaux à soude où le tirage est très-grand.

*Influence de la température de l'atmosphère.*

476. Quand la température de l'air brûlé dans une cheminée reste constante, et que la température extérieure augmente ou s'abaisse, le tirage varie en sens contraire. Mais l'influence de ces variations résulte principalement des phénomènes qui se produisent dans le foyer. La combustion est d'autant plus active, il y a d'autant moins d'air qui échappe à la combustion, que l'air a une plus grande densité, et par conséquent il faut moins d'air pour brûler la même quantité de combustible quand l'air extérieur est à une basse température que quand cette température est élevée. Ainsi tout concourt à rendre le tirage des cheminées plus grand dans l'hiver que dans toute autre saison.

477. On a cependant reconnu, comme nous le verrons plus tard en parlant des foyers, que dans les hauts fourneaux il y a un grand avantage à employer de l'air chaud au lieu d'air froid; mais les circonstances sont très-différentes de celles des foyers ordinaires : l'air est injecté sur le combustible avec une grande vitesse.

*Influence de la pression de l'atmosphère.*

478. En supposant l'air brûlé à la même température dans la chemi-

née, lorsque l'air extérieur est à différentes pressions, la vitesse d'écoulement resterait la même, quelle que soit la pression extérieure; mais le poids de l'air appelé, diminuant avec la pression, dans le même appareil, on brûlerait des quantités de combustible qui varieraient proportionnellement à la pression extérieure. Mais l'influence des variations du baromètre se manifeste principalement dans les foyers, la combustion est d'autant moins vive, il s'échappe d'autant plus d'air sans altération que la pression extérieure est plus faible. Cette influence est si grande, que quand la pression est réduite à 0,57, aux $\frac{3}{4}$ de la pression ordinaire, la combustion devient si languissante que la chaleur qu'elle dégage ne suffit plus pour la maintenir. Sur le Mont-Blanc, où le baromètre ne s'élève qu'à $0^{m}57$, M. de Saussure a observé que la combustion du charbon ne pouvait se maintenir qu'en l'alimentant par un soufflet.

*Influence de l'état hygrométrique de l'air.*

479. Comme les variations de pression et de température extérieure, la variation de l'état hygrométrique de l'air est sans influence sensible sur la vitesse d'écoulement, et le tirage ne devrait éprouver qu'une légère diminution par l'accroissement de l'état hygrométrique de l'air. Mais encore ici, comme dans les deux cas déjà examinés, l'effet produit sur le foyer l'emporte beaucoup sur le premier. A mesure que la quantité de vapeur d'eau en dissolution dans l'air augmente, une plus grande quantité d'air échappe à la combustion, les foyers languissent, et l'effet utile du combustible diminue.

480. On voit, d'après cela, que dans les temps lourds, et qu'on devrait désigner par l'épithète contraire, où l'on trouve à la fois une faible pression, une température élevée, et de l'air presque saturé de vapeur d'eau, le tirage des cheminées doit être beaucoup plus faible que dans les temps froids et secs, qui sont toujours accompagnés d'une grande hauteur de la colonne barométrique.

C'est aussi ce qu'on observe dans toutes les usines : les foyers languissent dans les temps chauds et humides. L'influence est alors la même sur les appareils de combustion et sur l'organe de la respiration, et il doit en être ainsi, car les phénomènes qui se produisent ont la plus grande analogie. L'effet produit sur les foyers est alors tel, que, dans la

plupart des verreries on est obligé de suspendre le travail pendant l'été, et qu'il en est de même dans d'autres usines où l'on n'a pas le moyen de produire l'excès de tirage que les circonstances atmosphériques exigeraient.

481. Il y a cependant, relativement à l'influence de l'humidité de l'air, quelques faits qui semblent en opposition avec ce que nous venons de dire. Depuis quelques années on a imaginé d'introduire de la vapeur dans l'air d'alimentation des foyers, ou en la faisant arriver librement dans le cendrier, ou en la faisant pénétrer dans des grilles creuses, d'où elle s'échappe par de nombreux orifices latéraux. Dans l'un et l'autre cas, l'air traverse cette vapeur et l'entraîne avec lui sur le combustible. Or, dans ces différents cas, la combustion est très-active et ne ressemble pas à ces combustions languissantes qui ont lieu par les temps humides. La raison de cette différence me paraît provenir uniquement de ce que, dans les appareils dont il est question, il y a un grand tirage qui compense l'effet résultant du mélange de la vapeur à l'air, car il est bien constaté qu'avec un accroissement convenable de tirage on peut toujours détruire l'effet provenant des circonstances atmosphériques nuisibles dont nous avons parlé.

*Influence des rayons solaires.*

482. Lorsque les rayons solaires pénètrent dans une cheminée dont la température est peu élevée, comme, par exemple, dans les tuyaux des cheminées d'appartements, on sait par expérience que la fumée reflue par le foyer. Il est probable que cet effet provient principalement de ce que les corps voisins, principalement les toits, étant fortement échauffés, donnent naissance à des courants d'air chaud dirigés de bas en haut, et par suite à des courants dirigés en sens contraire au-dessus des corps moins échauffés, et par conséquent autour des tuyaux de cheminée. On évite complétement ces effets en recouvrant les tuyaux de cheminée de mitres en terre cuite ou en métal.

## § 5. — APPAREILS DESTINÉS A SOUSTRAIRE LE TIRAGE DES CHEMINÉES A L'INFLUENCE DES VENTS ET DE LA PLUIE.

### *Appareils pour le sommet des cheminées.*

483. Les appareils qu'on a proposés pour remplir l'objet dont il est question sont très-nombreux; nous décrirons seulement les principaux. Ces appareils peuvent se diviser en deux classes, ceux qui sont fixes et ceux qui sont mobiles.

484. *Appareils fixes.* Dans la plupart des cheminées d'habitation on se contente de rétrécir l'orifice supérieur de la cheminée au moyen d'un tuyau conique, ou par la disposition indiquée fig. 11 (pl. 5). Par là on augmente la vitesse d'écoulement de la fumée et les chances de son refoulement par les vents. La petite étendue de l'orifice d'écoulement obvie aussi en grande partie à l'influence de la pluie et des rayons solaires.

485. Parmi les appareils fixes, le plus simple et en même temps le plus efficace, du moins dans les circonstances ordinaires, consiste en un chapeau en tôle, de forme variable, qui recouvre à une certaine hauteur l'ouverture supérieure du tuyau de cheminée, et dont les bords, d'un plus grand diamètre que celui du tuyau, descendent au niveau de l'orifice de ce tuyau ou plus bas, fig. 14 (pl. 5). Il est évident que par cette disposition on obvie complétement à l'influence de la pluie, des rayons solaires, et des courants d'air plus ou moins inclinés à l'horizon, mais de haut en bas. Mais cet appareil n'éviterait pas l'action des courants inclinés à l'horizon et dirigés de bas en haut. Il est cependant toujours suffisant pour les cheminées isolées.

486. L'appareil que nous venons de décrire a été modifié de plusieurs manières. La figure 12 (pl. 5) représente une élévation des mitres que l'on place le plus souvent sur les cheminées des habitations. Elles sont formées de deux larges tuiles ou plaques de plâtre, placées sur les bords de la cheminée, et disposées de manière à se réunir par leurs arêtes supérieures. Elles n'obvient qu'en partie seulement aux inconvénients qui résultent de la pluie et des vents, puisque l'appareil est ouvert des deux côtés. A la vérité, on place les deux plaques dans une direction

perpendiculaire à celle du vent le plus fréquent; mais cette disposition ne remplit qu'incomplétement son but et ne présente aucune solidité.

487. Les figures 13 et 14 (pl. 5) représentent une mitre en tôle qui a la plus grande analogie avec celle que nous venons de décrire; elle est formée d'une plaque de tôle ayant la forme d'un demi-cylindre, que l'on place horizontalement au-dessus du tuyau. On rend cet appareil beaucoup plus efficace en plaçant aux deux bouts du cylindre, à distance et perpendiculairement à sa direction, deux plaques de tôle (fig. 16 et 17, pl. 5).

488. La disposition indiquée par la figure 18 est encore souvent employée; elle serait très-efficace dans tous les cas si, en avant des quatre orifices, se trouvaient des plaques de tôle destinées à empêcher les courants d'air de pénétrer dans les tuyaux verticaux.

489. La figure 19 représente un appareil beaucoup plus simple, et qui est préférable sous tous les rapports; il serait beaucoup plus efficace s'il était pourvu d'un second tuyau horizontal perpendiculaire au premier et disposé de la même manière.

490. La figure 20 représente une disposition souvent employée; elle consiste en une calotte de tôle placée au-dessus du tuyau, comme dans la figure 15. Mais le chapeau est trop petit et placé trop haut, et il ne préserve le tirage que d'une partie des inconvénients auxquels il doit remédier. Il semble que dans la construction de ces appareils on ait craint de gêner le mouvement vertical de la fumée; mais la vitesse de sortie est entièrement indépendante de la direction de l'orifice d'écoulement. Il est toujours plus avantageux de faire des chapeaux larges et dont les bords descendent au-dessous de l'orifice de la cheminée.

491. La figure 21 (pl. 5) représente le même appareil avec une modification qu'on a crue avantageuse : le chapeau est garni inférieurement d'une calotte placée en sens contraire. On pensait que par cette disposition on ferait réfléchir en dehors les courants d'air qui viendraient en dessous; mais cette addition est complétement inutile, car, comme nous l'avons dit (472), les courants d'air suivent les surfaces qu'ils rencontrent et ne se réfléchissent pas.

492. Les appareils représentés par les figures 22 et 23 sont connus sous le nom de bonnets de prêtre. Il paraît que dans la plupart des circonstances ils obvient complétement à l'action des vents.

493. La figure 1re (pl. 6) représente un appareil formé d'un cylindre ouvert par les deux bouts et environnant le tuyau à fumée, qui est fermé à la partie supérieure, et garni latéralement de quatre grandes ouvertures; il produirait un très-mauvais effet, car les vents inclinés à l'horizon auraient une grande action sur le tirage de la cheminée. Cet appareil ne deviendrait efficace qu'autant que l'on ouvrirait la partie supérieure du tuyau à fumée, et qu'on placerait un chapeau au-dessus; mais alors il deviendrait analogue aux derniers que nous avons décrits.

494. L'appareil représenté figure 2 (pl. 6), qui est dû à M. Delisle-Saint-Martin, produirait les mêmes effets que ceux que nous avons décrits précédemment (492).

495. Enfin la figure 3 (pl. 6) représente une mitre imaginée par M. Millet, et qui est peut-être de toutes la plus efficace; elle est formée d'un tambour en tôle fermé à la partie supérieure, communiquant par le bas avec le tuyau à fumée, et percé d'un grand nombre d'orifices carrés percés de dedans en dehors, et dont les ébarbures forment autour de petites pyramides tronquées saillantes sur la surface extérieure. Cette mitre, placée sur un tuyau de poêle dans lequel on brûlait de la paille mouillée, et recevant, dans différentes directions, un courant d'air très-violent lancé par un ventilateur à force centrifuge, n'a jamais laissé refluer la fumée par la porte du poêle. L'efficacité de cette mitre provient probablement des remous qui se forment autour des orifices et qui empêchent l'air de pénétrer dans le tambour. Cette mitre devrait être préférée à toutes les autres sans un inconvénient grave qui oblige à un fréquent nettoyage : les matières solides entraînées par la fumée forment, dans l'intérieur, des pellicules minces, analogues aux toiles d'araignée, et qui bouchent bientôt les orifices.

496. De tous les appareils que nous venons de décrire, le meilleur et le plus simple, pour les cheminées isolées, est celui de la figure 15 (pl. 5). Pour les cheminées qui s'élèvent peu au-dessus des toits des maisons et pour lesquelles on a à craindre des remous dirigés dans tous les sens, l'appareil de Millet doit être préféré, quand les gaz n'entraînent pas des matières qui puissent boucher les orifices; dans le cas contraire, on peut employer les appareils figures 19, 22 et 23 (pl. 5).

497. *Appareils mobiles.* Examinons maintenant les appareils mobiles. Tous ont pour objet de diriger l'ouverture de sortie du côté opposé au

vent, de sorte que la fumée tende à prendre la même direction; alors non-seulement le vent ne s'oppose pas à la sortie de la fumée, mais il augmente toujours le tirage quand sa vitesse est plus grande que celle de la fumée (471).

498. Les figures 4 et 5 (pl. 6) représentent les dispositions les plus simples des appareils mobiles; le tuyau de cheminée se termine par un tuyau de tôle circulaire, enveloppé par un tuyau court, mobile autour de son axe, fermé supérieurement et garni latéralement d'une large ouverture avec ou sans rebord. La partie supérieure du manchon est garnie d'une girouette placée dans le plan vertical du diamètre qui divise l'ouverture latérale en deux parties égales, et sur le rayon ou le prolongement du rayon qui se trouve du côté de l'ouverture.

499. On a proposé à ces derniers appareils une modification qui au premier abord paraît devoir être très-efficace; cette nouvelle disposition est représentée (fig. 6, pl. 6); le tuyau d'écoulement est traversé par un tuyau concentrique d'un petit diamètre, d'une moindre longueur, et qui se termine extérieurement par un entonnoir. Il est évident que quand l'appareil est dirigé par le vent, l'air qui pénètre par le tube intérieur augmente le tirage; mais l'effet provenant de l'air en mouvement qui environne le tuyau est diminué, parce qu'il ne se manifeste que dans l'espace compris entre les deux tuyaux; de sorte qu'il n'est pas bien certain que cet appareil soit plus efficace que celui que nous avons décrit d'abord, à moins qu'il n'y ait un accroissement de vitesse du vent dans le tuyau intérieur, provenant de l'entonnoir par lequel l'air y pénètre, accroissement que l'expérience n'a pas constaté.

500. Les appareils mobiles seraient évidemment les meilleurs de tous, si l'on pouvait donner une mobilité parfaite au manchon; mais, comme le frottement est toujours assez considérable, il arrive quelquefois, lorsque le vent est très-faible, que l'ouverture latérale se trouve dirigée du côté du vent, et par conséquent, si le tirage est très-faible, que la fumée sort par le foyer. Ce cas peut arriver d'autant plus fréquemment, que dans cette position le vent n'a aucune action sur la girouette. A la vérité l'équilibre est instantané, c'est-à-dire, pour peu que la girouette soit dérangée, elle abandonne cette position pour ne plus y revenir; mais on conçoit facilement que les frottements peuvent, pour des vents très-

faibles, la faire persister même sous un angle assez grand. Cependant on peut toujours diminuer beaucoup les chances d'inefficacité de l'appareil, en donnant de plus grandes dimensions aux girouettes, et le plus de liberté possible aux mouvements.

501. Ces appareils se construisent toujours en tôle, et par conséquent seraient de peu de durée si on ne prenait pas les précautions nécessaires pour s'opposer à l'oxydation du fer. Le meilleur vernis que l'on puisse employer, est le goudron qui provient de la distillation du bois; je l'ai souvent employé pour des objets analogues, et j'ai reconnu qu'il résistait bien à l'air, et même à une température de plus de 200 degrés. Je pense que le goudron qui provient de la distillation de la houille pourrait être également employé avec avantage. Mais l'emploi du fer galvanisé, c'est-à-dire, couvert d'une lame mince de zinc, serait encore préférable. Le zincage du fer s'exécute par un procédé analogue à l'étamage.

502. La figure 7 représente une autre disposition qui me paraît préférable à toutes celles qui précèdent. Cet appareil consiste en un cône en tôle qui embrasse l'orifice de la cheminée et qui est mobile autour de son sommet; il est évident qu'il serait efficace, quand même le vent ne l'inclinerait pas; mais on peut le rendre très-mobile en plaçant son centre de gravité très-près du point de rotation, au moyen d'un anneau métallique placé au delà du sommet du cône.

503. On emploie quelquefois une disposition plus simple que les précédentes, et qu'on désigne sous le nom de bascule turque : elle est représentée figure 8 (pl. 6). Cet appareil se compose d'une plaque mobile autour d'un axe horizontal fixé contre les parois de la cheminée; la plaque ayant son diamètre horizontal égal à celui de la cheminée qui lui correspond, et son diamètre mobile étant plus grand que l'autre diamètre de la cheminée, il est évident que le vent, en agissant sur la partie supérieure de la plaque, l'inclinera de manière que la fumée sorte toujours dans la direction du vent. Cet appareil est très-simple, mais il a l'inconvénient d'être sans influence quand le vent est dirigé dans le plan vertical qui passe par l'axe de rotation. Cependant on peut l'employer avec avantage en dirigeant l'axe horizontal perpendiculairement à la direction des vents dominants.

504. On a encore proposé d'employer des cages à 2, 4, 6 ou 8 pans,

fermées supérieurement, et garnies sur chaque face d'une ouverture munie d'une porte à charnière horizontale et supérieure; ces portes sont maintenues deux à deux à un degré d'ouverture convenable, par une tringle qui les unit (fig. 9 et 10, pl. 6), de sorte que quand le vent souffle d'un côté, il ferme lui-même l'ouverture par laquelle il se serait introduit et agrandit l'ouverture opposée. Cette disposition pourrait facilement s'appliquer à de larges cheminées, et serait bien plus sûre et bien moins dispendieuse que les autres, parce qu'il suffirait de ménager vers le haut de la cheminée et dans la maçonnerie un certain nombre d'ouvertures que l'on fermerait par des portes liées entre elles par des tringles. Il serait plus commode et plus sûr de construire toute la lanterne en fer, et dans tous les cas les volets devraient être équilibrés par des contrepoids. On a employé, dans quelques circonstances, des lanternes à 6 ou 8 faces garnies de jalousies fixes ou mobiles. Je ne sais pas jusqu'à quel point ces appareils seraient efficaces, mais ils sont certainement beaucoup plus compliqués et plus dispendieux que les précédents.

505. En résumé, les appareils mobiles sont tous compliqués; dans certaines circonstances ils peuvent ne pas fonctionner, et je pense qu'on doit toujours leur préférer les appareils fixes.

506. *Appareils destinés à soustraire les foyers à l'influence des vents.* Les vents étant rarement dirigés de bas en haut, si la prise d'air qui alimente le foyer se faisait dans un lieu découvert et par un orifice horizontal pratiqué dans le sol et communiquant par un canal avec le foyer, ce dernier ne serait jamais influencé par les vents, quelle que fût d'ailleurs leur direction; et en faisant le canal très-large, de manière que la vitesse de l'air y soit très-petite, le canal ne diminuerait pas sensiblement le tirage. D'ailleurs, en prenant l'air en dehors de l'atelier, il y aurait toujours, même par les temps calmes, un avantage pour le tirage, surtout quand la température des ateliers est très-élevée, parce que, l'air de l'atelier étant plus chaud que l'air extérieur, la pression qui détermine le mouvement est plus petite quand le cendrier s'ouvre dans l'atelier que quand il communique directement avec l'air extérieur.

507. Dans certaines circonstances on peut disposer la prise d'air de manière à faire concourir le vent à l'augmentation du tirage. Il suffit évidemment pour cela de faire la prise au niveau du sol et de garnir l'orifice d'une trappe inclinée à 45° mobile autour de l'orifice, de manière

à pouvoir l'opposer au vent. J'ai eu plusieurs fois l'occasion d'établir cette disposition dans des appareils dont le tirage était presque anéanti par les vents dirigés en sens contraire du mouvement de l'air dans le foyer, et ils ont toujours complétement réussi.

508. On peut aussi employer le vent pour diriger des appareils analogues à ceux que nous avons décrits pour les cheminées.

509. L'appareil mobile le plus simple est représenté figures 11 et 12 (pl. 6). Il consiste en une calotte métallique mobile AB, armée d'une girouette disposée de manière que la calotte présente toujours son ouverture au vent, afin qu'il se dirige dans le canal.

510. Celui qui est représenté figures 14 et 15 (pl. 6), serait tout aussi efficace. Il est formé d'une tour carrée, percée sur chaque face d'une ouverture, fermée par un volet en bois ou en tôle, mobile autour d'une charnière horizontale, placée de manière que le plus faible effort puisse faire ouvrir le volet et livrer passage à l'air.

### § 6. APPAREILS DANS LESQUELS LE TIRAGE A LIEU AVANT QUE L'EFFET UTILE DE LA CHALEUR SOIT PRODUIT, OU PENDANT QUE LA CHALEUR PASSE DANS LE CORPS QUI DOIT ÊTRE ÉCHAUFFÉ.

511. Dans les appareils généralement employés, le tirage nécessaire à la combustion est produit par une cheminée dans laquelle se rend la fumée, lorsqu'elle a passé sur les corps qui doivent être échauffés. La cheminée, pour produire son effet, exige que l'air brûlé ait une température assez élevée, et de là une perte de chaleur considérable. Mais dans un grand nombre de cas on peut éviter cette perte par une disposition convenable de l'appareil. Ici nous nous bornerons à indiquer les principes de ces dispositions, et nous donnerons les détails de ces constructions plus tard, lorsqu'il sera question des différents emplois de la chaleur.

512. Imaginons qu'au-dessus d'un foyer bien encaissé s'élève une cheminée de 3 à 4 mètres de hauteur, à parois épaisses et peu conductrices, l'air brûlé aura dans cette cheminée une très-haute température et acquerra une très-grande vitesse d'ascension, beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire pour la combustion. Supposons maintenant qu'au-dessus de cette cheminée, dans son prolongement ou à côté, se

trouve la chaudière ou le corps qu'il faut échauffer, on pourra prolonger le parcours de la fumée de manière à la refroidir complétement ou presque complétement, et en quittant les surfaces de chauffe, elle pourra être abandonnée immédiatement dans l'air, ou introduite dans une cheminée qui n'aura d'autre effet que de la rejeter à la hauteur convenable dans l'atmosphère. C'est une disposition analogue qui existe dans les fours à fondre le verre destiné à la gobeletterie; la cheminée de tirage a seulement pour hauteur la distance de la grille à la voûte du fourneau, et l'air brûlé pourrait se refroidir complétement dans l'arche, si celle-ci avait une longueur suffisante.

513. Au premier abord, cette méthode ne semble applicable qu'autant que les corps qu'on veut chauffer ne doivent être portés qu'à une température qui excède peu la température ordinaire, puisque l'air brûlé ne peut pas être abandonné à une température plus basse que celle de ces corps. Mais en faisant mouvoir le corps à chauffer en sens contraire du mouvement de l'air brûlé, il est évident que, dans tous les cas, on pourrait utiliser la totalité de la chaleur de cet air, et le refroidir jusqu'à la température de l'atmosphère.

514. Cette méthode qui consiste, comme on voit, à placer la cheminée avant la chauffe, par conséquent à pousser l'air chaud dans les carneaux au lieu de l'y appeler, a un inconvénient que nous ne devons pas dissimuler. Les surfaces de chauffe doivent être beaucoup plus grandes que dans les dispositions ordinaires, parce que ces surfaces ne sont pas chauffées directement par le rayonnement du combustible, et que la chaleur n'y est apportée que par l'air brûlé; mais malgré cet inconvénient, il est beaucoup de cas, comme nous le verrons plus tard, dans lesquels cette méthode présenterait une très-grande économie de combustible.

515. On pourrait aussi disposer les appareils de manière à produire le tirage pendant la chauffe. La disposition consisterait à placer la cheminée au-dessus du foyer, et dans la cheminée le corps qui doit être échauffé. Si les canaux de circulation sont assez étroits, les surfaces de chauffe assez étendues, l'air brûlé parviendra au sommet de la cheminée à une température peu supérieure à celle du corps qui doit être échauffé, quoique le tirage soit très-puissant, parce que la vitesse d'ascension dépendra de la température moyenne de l'air brûlé dans les canaux de circulation, et que la température à la partie inférieure sera

celle du foyer. Cette disposition se rencontre dans les fours à chaux et dans les fours à plâtre.

Dans ces différentes dispositions, le diamètre de la cheminée se calculerait par les mêmes formules que nous avons données pour le cas où les cheminées sont placées après l'appareil de chauffage.

# CHAPITRE VI.

## MOUVEMENTS DE L'AIR PRODUITS PAR DES MACHINES OU PAR DES JETS DE VAPEUR.

### § 1. COMPARAISON DES EFFETS UTILES PRODUITS DIRECTEMENT PAR LA CHALEUR ET PAR LES MACHINES.

516. L'effet d'une cheminée consiste à appeler à l'extrémité du canal avec lequel elle communique, un certain volume d'air avec une certaine vitesse, à le faire circuler dans le canal, et à le verser plus ou moins altéré et plus ou moins échauffé dans l'atmosphère, par son orifice supérieur. Cet effet qui résulte de la force ascensionnelle de l'air chaud, et qui exige que l'air, à son entrée dans la cheminée, conserve une température assez élevée, pourrait évidemment être produit par une action mécanique directe; on pourrait employer des pompes, des ventilateurs de différentes espèces, et des moteurs quelconques; les machines pourraient être placées à l'une des extrémités ou en un point quelconque du circuit.

517. Les mouvements des gaz produits par la chaleur exigent beaucoup de combustible; par exemple, pour les fourneaux des chaudières à vapeur, la dépense, pour l'appel d'air dans le foyer, excède le quart de la consommation totale de combustible. Ainsi, si on avait un emploi utile de la chaleur de l'air brûlé, quand il est refroidi à 300°, et si, en même temps, le tirage mécanique coûtait moins que le tirage par la chaleur, il serait avantageux d'employer le premier moyen.

518. Or, dans un grand nombre de cas, on peut utiliser la chaleur perdue, et nous allons voir que le tirage mécanique dans les cheminées coûte beaucoup moins que le tirage par la chaleur. Je rapporterai

d'abord deux expériences qui établissent ce fait d'une manière évidente.

519. Dans un des bains Vigier établis sur la Seine, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière à eau chaude, se répartit dans douze tuyaux d'un petit diamètre, et de 20 mètres de longueur, plongés dans le réservoir d'eau froide; par cette circulation, la fumée se refroidit complétement, et à son entrée dans la cheminée elle a sensiblement la température de l'eau froide du réservoir. Entre l'extrémité des conduits et la cheminée se trouve un ventilateur qui aspire la fumée et la jette dans la cheminée. Le tambour du ventilateur a $0^{m},80$ de diamètre, 0,40 de largeur; le tuyau d'écoulement a 0,20 de diamètre; les ailes font quarante tours à la minute, et la machine est mise en mouvement par un seul homme. Il résulte de plusieurs expériences, que, par ce travail mécanique, on a brûlé en deux heures $0^{st},44$ de bois pelard, pesant 390 kilogrammes le stère; ainsi on a brûlé $0,44 \times 390 = 171$ kilogrammes de bois en deux heures, ou 85 kilogrammes par heure. En admettant que 1 kilogramme de bois soit équivalent à $\frac{1}{3}$ kilogramme de houille, du moins pour la quantité d'air nécessaire à la combustion, ce qui s'éloigne peu de la vérité, le travail d'un homme suffirait à la combustion de 42 kil. de houille, dans les circonstances les plus défavorables, puisque la fumée passait dans des tuyaux d'un petit diamètre et d'une grande longueur. Or, le tirage par la chaleur coûterait au moins $\frac{42^{k}}{4} = 10^{k},5$ de houille; ce qui correspond à la force de 2,5 chevaux-vapeur; mais comme un cheval vaut sept hommes, il en résulte que le tirage mécanique qui s'effectue par un seul homme coûte réellement 2,5 chevaux ou 17 hommes, quand ce tirage est produit par la chaleur de l'air dans une cheminée ordinaire, dans laquelle la fumée arrive à $300^{o}$.

520. Dans la brasserie belge de Louvain, un ventilateur qui emploie un travail mécanique de 6 chevaux suffit pour produire l'appel des fourneaux dans lesquels on brûle par heure 1000 kilogr. de houille, ce qui équivaut à peu près à une machine de 200 chevaux. Ainsi, dans cette usine, le travail de 6 chevaux-vapeur équivaut au travail de l'air chaud dans la cheminée, qui exigerait au moins 250 kilogr. de houille, ce qui correspond à 50 chevaux.

521. Ainsi il y a un grand avantage à remplacer le tirage à l'air chaud par une action mécanique, malgré l'accroissement de résistance qu'entraîne le refroidissement complet de la fumée. Il est évident que, dans

l'appareil des bains Vigier, le rapport du travail produit par la chaleur perdue au travail effectif aurait été beaucoup plus grand, si on avait eu égard à la résistance de la fumée dans les longs tuyaux qu'elle parcourt (1).

522. Proposons-nous maintenant de déterminer d'une manière générale le rapport entre le travail produit par l'air chaud qui s'élève dans une cheminée, et le travail qu'on pourrait effectuer par la vapeur qui serait engendrée au moyen de la chaleur que renferme la fumée.

523. On sait qu'un cheval-vapeur consomme moyennement 4 kilogr. de houille à l'heure, ou $4.7500 = 30000$ unités de chaleur, et par seconde $30000 : 3600 = 8{,}33$. Or, comme la force d'un cheval est de 75 kilogrammètres, le travail de 1 kilogrammètre consomme $8{,}33 : 75 = 0{,}11$ unité de chaleur.

Cela posé, la quantité de chaleur perdue par une cheminée $= pt : 4$; $p$ désignant le poids de l'air qui s'écoule par seconde, et $t$ l'excès de la température de l'air chaud sur celle de l'air extérieur. Alors la quantité

---

(1) Les douze tuyaux qui traversent le réservoir d'eau froide ont une longueur commune de 20 mètres, et ensemble une section de $0^m,1$. On peut facilement trouver la longueur d'un tuyau unique de même section, qui produirait la même résistance; en effet, désignons par $r$ les rayons des petits tuyaux, et par R le rayon du cercle dont la section est égale à la somme des sections des douze petits cercles, nous aurons

$$r = R\sqrt{\frac{1}{12}}.$$

Le rapport de la somme des circonférences des douze petits cercles à la somme de leurs surfaces sera

$$\frac{12.2\pi R\sqrt{\frac{1}{12}}}{\pi R^2} = \frac{12.2.\sqrt{\frac{1}{12}}}{R} = \frac{6{,}85}{R};$$

pour le cercle dont le rayon est R, ce rapport sera

$$\frac{2\pi R}{\pi R^2} = \frac{2}{R}.$$

Alors, pour que la longueur du tuyau unique compense le moindre rapport entre sa circonférence et la surface de la section, cette longueur doit être égale à

$$20 \times \frac{6{,}85}{R} : \frac{2}{R} = 20.3{,}425 = 68^m,50.$$

de kilogrammètres que cette chaleur pourra produire sera

$$\frac{pt}{4} \cdot \frac{1}{0,11} = \frac{pt}{0,44} = 2,27pt.$$

524. Le travail produit par l'air chaud que renferme une cheminée, sera $pv^2 : 2g$, en désignant par $p$ le poids de l'air froid appelé à sa partie inférieure, ou celui de l'air chaud qui s'écoule par sa partie supérieure, et par $v$ la vitesse d'écoulement.

Dans une cheminée ordinaire, la surface de l'orifice supérieur diffère peu de celle de la section des carneaux, et la vitesse qu'elle imprimerait à l'air, s'il n'éprouvait pas de résistance avant de pénétrer dans la cheminée, est plus petite que celle qui correspond à la hauteur de la colonne d'air chaud; en la supposant égale, la vitesse qu'elle imprimerait à l'air froid, serait

$$v = \frac{\sqrt{2gHat}}{(1+at)},$$

et le travail nécessaire pour l'appel d'un poids $p$ d'air froid serait

$$\frac{pv^2}{2g} = \frac{pHat}{(1+at)^2}.$$

Alors le rapport R du travail qui pourrait être produit par la chaleur perdue au travail effectif est

$$R = \frac{2,27pt(1+at)^2}{pHat} = \frac{2,27(1+at)^2}{aH}.$$

525. En prenant $t = 300$, $H = 30$, circonstances qui se rencontrent ordinairement dans les grandes cheminées d'usines, on trouve $R = 97$. Ce nombre serait beaucoup plus grand si on avait égard au frottement de l'air dans la cheminée. Il serait plus petit si la cheminée avait une section très-grande relativement à celle des carneaux; mais cette circonstance se rencontre rarement; d'ailleurs, quand même ce rapport serait celui de 4 à 1, dans l'hypothèse la plus défavorable, le rapport précédent ne serait pas diminué de moitié.

Ainsi, dans tous les cas, il y a un grand avantage à remplacer le tirage à l'air chaud par une action mécanique, quand on peut utiliser toute la chaleur de l'air brûlé.

526. Mais il faut bien remarquer que l'avantage dont il est question n'est aussi considérable qu'autant que l'action mécanique est produite par la vapeur; il serait beaucoup plus petit si l'action mécanique était

produite par des hommes. En effet, le travail d'un cheval-vapeur coûte 4 kilogr. de houille par heure, ou 40 kilogrammes dans 10 heures, ou à peu près 2 francs au prix de la houille à Paris; et comme un cheval-vapeur équivaut à 7 hommes, il s'ensuit que le travail d'un homme-vapeur coûte pendant 10 heures environ 30 cent., tandis que la journée d'un manœuvre est de 2 francs. Mais comme il faudrait nécessairement 2 hommes, attendu qu'un seul ne pourrait pas soutenir sans interruption le même travail pendant dix heures, il faudrait estimer le travail en argent au moins à 4 francs, et, par conséquent, le travail par des hommes coûterait au moins 14 fois plus que par la vapeur. D'après les nombres précédents, le travail d'un homme coûterait autant que celui de deux chevaux-vapeur, du moins à Paris.

527. La machine, quelle qu'en soit la nature, devrait avoir évidemment, outre la puissance suffisante pour suppléer à la cheminée, celle qui serait nécessaire pour vaincre les frottements dans l'appareil où la chaleur devrait être utilisée. Dans tous les cas qui pourront se présenter, il sera facile de déterminer le travail qu'elle doit effectuer, en partant des lois et des formules données dans le chapitre précédent.

Les machines employées sont le ventilateur à force centrifuge, la vis d'Archimède et les pompes. On emploie aussi des jets de vapeur; nous examinerons successivement ces différents modes de tirage.

## § 2. — VENTILATEUR A FORCE CENTRIFUGE.

528. Considérons un tambour fixe fermé de toute part, dont l'axe de figure soit occupé par un axe métallique mobile, garni de plusieurs ailes planes ou courbes, qui dans leur mouvement de rotation parcourent la capacité intérieure du tambour. Par la rotation des ailes, l'air sera mis lui-même en mouvement, et, par l'effet de la force centrifuge, il s'accumulera à la circonférence du tambour et se dilatera au centre. Mais si les deux joues du tambour sont percées à leur centre d'un orifice, et si la circonférence du tambour est ouverte, l'air sera aspiré par le centre du tambour et rejeté à sa circonférence. On conçoit alors que si les orifices des joues ou la circonférence du tambour étaient en communication avec un tuyau, ou si ces deux circonstances avaient lieu en

même temps, l'air serait aspiré ou poussé dans le tuyau, ou en même temps aspiré dans l'un et poussé dans l'autre.

529. Quoique à la rigueur tous les ventilateurs soient à la fois aspirants et soufflants, nous désignerons sous le nom de *ventilateurs aspirants* ceux qui jettent l'air aspiré dans l'espace environnant par tous les points de la circonférence du tambour; sous celui de *ventilateurs soufflants,* ceux qui aspirent directement l'air environnant pour le faire écouler par un tuyau qui communique avec la circonférence du tambour; et sous celui de ventilateurs *aspirants et soufflants,* ceux qui appellent l'air par des tuyaux de conduite plus ou moins longs, et le versent dans un canal, comme les ventilateurs soufflants.

### *Ventilateurs aspirants.*

530. Les figures 1 et 2 (pl. 7) représentent l'élévation et une projection horizontale d'un ventilateur aspirant. ABC est un tambour en tôle ou en bois dont les joues sont réunies par des barres transversales; DF est un patin en fonte fixé au tambour et au sol. GIKL est un tuyau bifurqué qui aboutit d'une part aux deux joues du tambour, et de l'autre à la prise d'air. M est une poulie fixée à l'arbre. NO le support en fonte de l'arbre. PQ une roue en bois ou en fonte garnie d'une manivelle R, dont le mouvement se transmet à l'arbre par la courroie ST qui passe sur la poulie M.

531. Les ailes des ventilateurs peuvent être planes ou courbes, et, dans tous les cas, on peut établir une relation quelconque entre la somme des surfaces par lesquelles l'air entre dans l'appareil et celles par lesquelles il s'échappe. Quand les ailes sont planes, et qu'il en est de même des faces du tambour, l'air s'échappe par toute la circonférence, et, par conséquent, à moins que le tambour n'ait qu'une très-petite épaisseur, les surfaces de sortie sont plus grandes que les surfaces d'entrée; mais en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux troncs de cône, et aux ailes une forme trapézoïdale, on fera varier à volonté l'étendue de la surface totale des orifices de sortie. Lorsque les ailes sont courbes, les orifices de sortie sont les sections faites dans les canaux, à leur extrémité, perpendiculairement à leur axe. Il est évident

qu'en donnant aux joues du ventilateur la forme de deux surfaces de révolution, et aux ailes des largeurs convenables aux différentes hauteurs, on pourra, de même que pour les ventilateurs à ailes planes, établir une relation quelconque entre les surfaces des orifices d'entrée et de sortie de l'air.

532. Les phénomènes qui se produisent dans les ventilateurs sont très-compliqués; mais on peut se faire une idée assez nette du mouvement général que l'air y éprouve, en regardant l'air comme un fluide incompressible, et en admettant que les molécules d'air aient la même vitesse dans tous les points d'une même section.

Nous supposerons d'abord que les canaux du ventilateur aient la même section dans toute leur étendue, et que la somme des surfaces des orifices de sortie soit égale à la somme des surfaces des orifices d'accès.

533. On démontre, en mécanique, que si un tuyau AB (fig. 3, pl. 7) cylindrique, et complétement ouvert à ses deux bouts, tourne autour d'une ligne O, perpendiculaire à son axe, l'air sort par l'extrémité A du tuyau avec une vitesse égale à la vitesse de rotation à cette extrémité. La vitesse d'écoulement est la même quand le tuyau est plus ou moins long, pourvu que la distance AO reste constante; elle est encore la même quand le tuyau est courbe. Si on suppose que l'orifice A soit fermé, dans tous les cas possibles, la pression exercée par l'air contre la surface intérieure de la cloison, sera égale à la hauteur d'air correspondante à la vitesse de rotation du point A.

534. Il résulte de là, que si les canaux d'un ventilateur avaient partout la même section, et si l'air n'éprouvait point de résistance pour y pénétrer, l'air entrerait dans le ventilateur et en sortirait avec une vitesse égale à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes, du moins elle n'en différerait que d'une quantité très-petite due au frottement de l'air dans la machine. Mais les ventilateurs sont toujours destinés à appeler de l'air à travers des tuyaux plus ou moins longs, dans lesquels il éprouve une certaine résistance, ou par les frottements ou par les rétrécissements. Le calcul indique qu'alors la hauteur d'air $V^2 : 2g$ qui correspond à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes, est égale à la hauteur d'air H qui représente la dilatation à l'extrémité du canal d'appel qui communique avec le ventilateur, augmentée des hauteurs d'air $h$ et $h'$ qui correspondent à la vitesse d'écoulement et aux frottements de l'air

dans le ventilateur; ainsi on a

$$\frac{V^2}{2g} = H + h + h'.$$

La valeur de H est aussi égale à la hauteur d'air qui produirait l'écoulement dans le tuyau d'appel; ainsi on pourra facilement la calculer d'après ce que nous avons dit (368). Si le canal était cylindrique d'une longueur L et d'un diamètre D, et si sa section avait une surface égale à la somme des surfaces des sections des canaux du ventilateur, la vitesse dans le canal correspondrait à la hauteur d'air $h$, et on aurait

$$H = h + \frac{KLv^2}{D}.$$

La valeur de $h'$ pourrait s'obtenir en calculant le frottement de l'air dans chaque canal, et en faisant la somme de ces résistances.

535. Quant au travail dépensé, il se compose du travail relatif à l'appel, de celui qui provient du frottement de l'air dans la machine et de celui qui résulte de la vitesse imprimée à l'air à la sortie du ventilateur. En désignant par $p$ le poids de l'air appelé par seconde, le travail de l'appel sera $pH$; celui qui est absorbé par le frottement sera $ph'$; et celui de la sortie sera $pv'^2 : 2g$, en désignant par $v'$ la vitesse absolue de l'air qui s'écoule; or, l'air s'écoule avec une vitesse relative correspondante à la hauteur d'air $h$, et il possède en même temps une vitesse de rotation égale à celle de l'extrémité des ailes; aussi sa vitesse absolue est la résultante de ces deux vitesses qui sont rectangulaires dans le cas dont il s'agit; elle sera par conséquent égale à

$$\sqrt{V^2 + 2gh}; \quad \text{et on aura} \quad \frac{pv'^2}{2g} = p\left(\frac{V^2}{2g} + h\right).$$

Alors le travail total sera

$$pH + p\frac{V^2}{2g} + ph + ph'; \quad \text{ou}, \quad 2p\frac{V^2}{2g},$$

536. Mais à ce travail, qui résulte seulement du mouvement imprimé à l'air, et des frottements, il faudrait ajouter celui qui provient du choc de l'air contre les palettes, et des vibrations qui se produisent toujours dans les appareils qui se meuvent avec une grande vitesse, et en outre le travail absorbé par les transformations de mouvement. Nous reviendrons plus tard sur ces différents points. Maintenant nous dirons seulement

que la perte de travail due au choc des veines d'air par les ailes lorsqu'elles pénètrent dans les canaux, doit être très-faible ; car on sait qu'il n'y a point de perte de travail dans le choc des corps parfaitement élastiques, et on doit regarder les veines d'air et les ailes des ventilateurs comme étant dans ce cas, car l'air est parfaitement élastique et les lames de bois ou de métal dont les ailes sont formées peuvent être assimilées aux corps parfaitement élastiques, du moins pour les faibles compressions que les chocs contre l'air leur font éprouver. D'ailleurs, le travail perdu dans le choc de deux corps dont l'un seulement est élastique, résulte uniquement de celui qui est employé à déformer d'une manière permanente le corps qui n'est pas élastique ; or, on ne trouve pas dans les ventilateurs qui ont fonctionné longtemps, d'altération dans la forme des ailes qui permette de supposer une perte de travail notable dans leur choc contre les veines d'air.

537. Si on faisait abstraction de l'influence de l'air environnant, tout ce qui précède serait applicable à un ventilateur dans lequel l'air aurait partout la même vitesse, mais dont les canaux seraient courbes. Alors, pour deux machines ayant les mêmes dimensions, qui tourneraient avec la même vitesse, et dont l'une aurait ses canaux dirigés dans le sens des rayons du tambour, et dont l'autre aurait ses canaux courbes, la convexité dans le sens du mouvement, et desquelles l'air s'échapperait tangentiellement au cercle du tambour, la vitesse absolue de l'air sortant serait pour la première $\sqrt{V^2+v^2}$, et pour la seconde $V-v$ ; et, dans ces deux cas, le travail dépensé pour l'écoulement serait

$$p\frac{V^2+v^2}{2g}; \quad \text{et} \quad p\left(\frac{V-v}{2g}\right)^2.$$

La première quantité excède la seconde de $2Vv:2g$. Mais cette différence devient très-petite et négligeable quand V est très-grand par rapport à $v$ ; ce qui arrive presque toujours quand les résistances à vaincre sont très-grandes. D'ailleurs le cas que nous avons supposé ne peut pas se réaliser : toujours les ailes coupent la circonférence sous un angle assez grand, et par conséquent la différence entre la vitesse absolue de l'air dans ces machines et dans les ventilateurs à ailes planes est toujours plus petite que $2Vv:2g$. En outre, il faudrait avoir égard au plus grand frottement dans les canaux courbes, à cause de leur plus grande longueur.

538. Cependant, si les ventilateurs à ailes courbes se comportaient sous

tous les autres rapports comme ceux qui sont à ailes planes, on devrait les employer de préférence. Mais les phénomènes qui se produisent dans les ventilateurs à ailes courbes sont beaucoup plus compliqués que ceux qui se manifestent dans les ventilateurs à ailes planes, et les premiers donnent naissance à des résistances qui font disparaître les avantages qu'on pourrait en espérer.

539. Considérons un canal *abc* (fig. 6, pl. 7) mobile autour du point *o*, recourbé à angle droit à son extrémité et tournant dans le sens *ab*. Il est évident que pendant le mouvement, l'air se comprimera contre le coude du tuyau et qu'il se dilatera devant l'ouverture; le premier effet augmentera seulement le travail produit, mais le second changera toutes les conditions du mouvement. Ces changements ne peuvent pas être négligés, car la dilatation de l'air devant l'orifice tend seule à donner à l'air la même vitesse que la force centrifuge elle-même, du moins quand le tuyau est disposé comme l'indique la figure. Les mêmes effets doivent se produire dans les ventilateurs à ailes courbes, car si on conçoit les canaux fermés par des cloisons perpendiculaires à leur axe, l'air extérieur placé devant les cloisons se dilatera nécessairement par le mouvement, jusqu'à ce que la vitesse de l'air environnant, pour suivre ces cloisons, soit égale à leur vitesse absolue; et l'air qui se trouve au-dessus des parties libres des ailes sera mis en mouvement (fig. 16, pl. 6). Quand les orifices des canaux seront libres, que l'écoulement de l'air appelé s'effectuera, une partie de la dilatation subsistera; car, pour qu'elle fût nulle, il faudrait que la vitesse relative d'écoulement fût égale à la vitesse de rotation, et c'est ce qui n'existe jamais. Cette dépression de l'air derrière les orifices augmentera nécessairement l'effet produit, de sorte qu'il faudra donner une moindre vitesse à la machine pour obtenir le même appel et la même vitesse d'écoulement; mais la dépense de travail sera augmentée de l'effet produit par l'air sur les orifices, et du mouvement que les parties libres des ailes imprimeront à l'air environnant.

540. De tout cela il résulte que les ventilateurs à ailes courbes, qui ont si peu d'avantages sur les autres, même en négligeant les effets qui proviennent du contact de l'air extérieur, et en n'ayant point égard au plus grand frottement de l'air qui les parcourt, du moins quand les résistances dans les tuyaux d'appel sont très-grandes relativement aux vitesses imprimées à l'air, doivent avoir en réalité un désavantage marqué

sur ceux qui sont à ailes planes et dont les canaux sont dirigés suivant les rayons.

541. Dans ce qui précède, nous avons supposé que le ventilateur à ailes planes avait des canaux à section constante, et par conséquent que les joues étaient coniques. Mais si les joues étaient planes, et c'est ce qui arrive ordinairement, les canaux seraient évasés; alors la partie du travail dépensé relative à la vitesse imprimée à l'air dans le tuyau d'aspiration et dans les canaux, serait beaucoup diminuée; car on sait que, quand un liquide s'écoule par un tuyau évasé, il n'y a point de perte de hauteur motrice due à l'étranglement, quand la variation de section a lieu d'une manière continue. Ainsi cette disposition serait plus avantageuse que celle que nous avons supposée, et à plus forte raison préférable à celle dans laquelle les ailes sont courbes.

542. En n'ayant point égard à la résistance du milieu environnant, M. Combes a été conduit à une disposition nouvelle des ventilateurs aspirants, qu'il regarde comme préférable de beaucoup à celles qui sont généralement employées.

M. Combes admet que, dans tous les cas, la vitesse d'écoulement de l'air par la circonférence du tambour est égale à la résultante de la vitesse relative de l'air dans les canaux et de la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes. D'après cela, l'air doit s'écouler par des canaux courbes dont la convexité soit tournée dans le sens du mouvement, et disposés de manière que la direction de la dernière tangente à l'axe de chaque canal se rapproche le plus possible de la tangente à la circonférence du tambour; mais comme les canaux doivent être d'autant plus nombreux que l'on veut se rapprocher davantage de la limite en question, et qu'alors le frottement de l'air dans les canaux augmente, M. Combes s'est borné à prendre douze canaux, et il donne à l'orifice d'accès un rayon égal à la moitié de celui du tambour.

La courbure des ailes étant arbitraire, M. Combes la suppose circulaire, et il détermine le rayon et les positions des ailes par ces deux conditions : qu'elles soient tangentes au cercle extrême du tambour, et qu'elles coupent la circonférence de l'orifice d'accès de manière à éviter le choc de l'air contre leur extrémité. Pour satisfaire à cette dernière condition, il prend la résultante de la vitesse de l'air à son entrée dans les canaux et de la vitesse de rotation prise dans une direction opposée, et il

donne la direction de cette résultante à la tangente des ailes au point où elles coupent la circonférence du cercle d'accès.

Les ailes sont fixées sur la joue pleine du ventilateur qui par conséquent est elle-même mise en mouvement. La largeur des ailes est deux fois plus grande à l'extrémité qu'au centre, et avec ces dimensions la somme des surfaces des orifices de sortie de l'air est égale à la moitié de la surface de l'orifice d'accès.

543. La figure 16 (pl. 6) représente une section de l'appareil par un plan perpendiculaire à l'axe de rotation; la figure 17 (pl. 6) une section méridienne; la figure 18 le disque circulaire qui porte les ailes; la figure 19 une vue de face et de profil du support monté à l'extrémité de l'arbre tournant, du côté de l'arrivée de l'air, avec les deux traverses *aa* sur lesquelles sont vissés les diaphragmes ou feuilles de tôle mince dont la figure 20 offre une élévation. Ces feuilles aboutissent au disque CC, mais sans le toucher. La figure 21 est une vue de face et de profil des pièces qui fixent les ailes sur le disque DD; pour cet effet, des boulons filetés, rivés sur les bords des ailes, passent à travers le disque sur lequel ils sont serrés par des écrous.

A est l'axe du ventilateur, en fer forgé; il peut avoir de 27 à 30 millimètres de diamètre, et peut être placé horizontalement ou verticalement. Dans l'appareil décrit, il est horizontal.

CC, figure 17, est une plaque en bois, circulaire ou carrée, posée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine et percée d'une ouverture circulaire dont le centre est sur l'axe, et dont le rayon $= 0^m,30$. A cette ouverture est adapté le conduit évasé E, qui met le tarare en communication avec l'espace dans lequel on veut renouveler l'air, ou avec des conduites qui communiquent avec cet espace.

DD, fig. 18, est un disque circulaire en bois, cerclé en fer mince. Ce disque a la forme d'un solide de révolution dont la figure 17 représente un méridien; il est invariablement fixé à l'axe A, et les ailes courbes du tarare y sont attachées. Son diamètre est assez grand pour qu'il déborde les ailes de 2 ou 3 centimètres.

Les ailes courbes sont en tôle de fer, d'une épaisseur de 2 millimètres au plus; elles sont au nombre de douze, toutes fixées, comme il a été dit, au disque DD. La figure 16 représente la section de ces ailes par un plan normal à l'axe du ventilateur.

L'axe horizontal A est supporté à une de ses extrémités par la traverse horizontale en fer *aa* (fig. 19, pl. 6), placée suivant le diamètre horizontal de l'ouverture circulaire. Cette traverse, qui doit être amincie pour ne pas gêner l'entrée de l'air dans le ventilateur, peut être soutenue dans son milieu par un support vertical F appuyé sur le bord inférieur de l'ouverture circulaire. GG sont deux feuilles de tôle mince fixées à la traverse *aa*, et découpées de manière à s'approcher très-près des arêtes intérieures des ailes, de la face interne du disque DD, et de la surface cylindrique de l'axe A. Ces feuilles, uniquement destinées à empêcher le mouvement giratoire de l'air et à l'obliger à pénétrer dans les canaux mobiles formés par les ailes courbes, avec une vitesse absolue dirigée suivant les rayons du ventilateur, ne doivent frotter contre aucune des parties mobiles de la machine, mais doivent s'en approcher le plus près possible.

La seconde extrémité de l'axe A porte sur un mur ou sur un appui convenablement disposé pour la recevoir. Dans la figure elle porte sur une partie du mur du bâtiment. Y est un écrou qui serre fortement le disque D contre l'embase de l'arbre A.

Entre le disque mobile DD et le support de l'axe, en dehors du ventilateur, se trouve une poulie P, fixée à l'arbre A et destinée à transmettre le mouvement de rotation au moyen d'une courroie.

544. Le ventilateur de M. Combes n'a point encore été exécuté sur une grande échelle, et les avantages qui résultent des calculs de l'auteur n'ont point encore été constatés par l'expérience; mais il me paraît peu probable que ces machines soient plus avantageuses que les anciennes.

D'abord la disposition qui a pour objet de diminuer la vitesse absolue de l'écoulement dans l'air, doit être plus que compensée par le mouvement que les parties libres des ailes impriment à l'air environnant; par l'accroissement de frottement de l'air dans le ventilateur, résultant de l'allongement des canaux; et enfin par une plus grande vitesse relative de l'air à l'extrémité des canaux.

Quant à la disposition qui a pour objet d'éviter le choc de l'air dans l'appareil, elle ne peut convenir évidemment que pour une seule vitesse de la machine; ainsi, en supposant qu'elle obviât complétement à l'inconvénient dont il est question, cet avantage disparaîtrait, au moins en partie, quand la vitesse de la machine deviendrait

plus grande ou plus petite que celle qui a été supposée lors de la construction.

Ainsi cette disposition ne pourrait être utile que pour les machines qui ne devraient éprouver que de faibles variations de vitesse. Mais je regarde comme peu probable que les chocs produisent une perte notable de travail, et, par conséquent, que, sous ce rapport, la courbure des ailes, à leur origine, ait une influence bien sensible sur l'effet utile de la machine. Cette disposition aurait cependant un très-grand avantage si elle évitait les vibrations de l'air dans l'appareil, vibrations qui occasionnent, sans aucun doute, une grande perte de travail. Mais il n'en est probablement pas ainsi; car on sait que les lames minces, placées dans le sens des courants, produisent dans l'air des vibrations plus grandes que quand elles sont placées obliquement; et d'un autre côté, la plaque fixe, destinée à empêcher le mouvement giratoire de l'air, pourrait bien à elle seule occasionner plus d'ébranlement qu'on n'en veut éviter. On sait, d'après les belles expériences de Savart, que quand une barre passe rapidement entre deux autres barres fixes, mais sans les toucher, il en résulte dans l'air un ébranlement qu'on peut assimiler à celui d'un violent coup de marteau; une seule barre fixe produit un effet analogue mais plus faible. Il est fort douteux, d'après cela, que le passage rapide des bords intérieurs des ailes dans le voisinage des bords de la plaque fixe ait lieu sans provoquer d'ébranlement.

Ainsi des expériences directes seraient nécessaires pour reconnaître si la disposition de M. Combes évite réellement les ébranlements. Ces expériences seraient d'ailleurs très-simples, car elles consisteraient à vérifier si, pour les grandes vitesses, les appareils de M. Combes résonnent comme les appareils ordinaires. Et, dans tous les cas, il serait nécessaire de faire avec les appareils dont il est question, et avec les ventilateurs à ailes planes, des expériences comparatives, qui seules pourraient décider si réellement les nouveaux appareils ont de l'avantage sur les anciens.

545. D'après tout ce qui précède, je pense qu'il faut, du moins jusqu'à ce que la question ait été complétement éclaircie par l'expérience, s'en tenir aux ventilateurs à ailes et à joues planes, qui, suivant toutes les probabilités, sont encore les plus avantageux.

Occupons-nous maintenant des détails de construction de ces appareils

et des dimensions qu'il convient de leur donner dans les différents cas qui peuvent se présenter.

546. *Dispositions des ventilateurs à ailes planes et à joues planes.* Les dimensions des canaux formés par les ailes doivent évidemment être telles que l'air ait sensiblement la même vitesse dans tous les points d'une même section, et que l'écoulement ait lieu à plein orifice. Des ailes trop courtes et en trop petit nombre pourraient avoir l'inconvénient de produire derrière elles un appel de dehors en dedans par la circonférence. Des canaux trop longs relativement à leur section auraient seulement l'inconvénient d'augmenter le frottement de l'air dans la machine. Mais comme, en général, ce frottement est très-petit comparé aux autres résistances, il vaut mieux employer des canaux trop longs que des canaux trop courts. Je pense qu'en donnant au tambour un diamètre double de celui de l'orifice d'appel, en prenant 6 grandes ailes ayant pour hauteur la distance des bords de l'orifice d'appel à la circonférence du tambour, et en plaçant entre elles, au milieu des intervalles qui les séparent, 6 autres ailes d'une hauteur 2 fois plus petite, mais terminées comme les premières à la circonférence du tambour, on satisfera aux conditions exigées.

547. Pour éviter les variations brusques de vitesse, qui occasionnent toujours une certaine perte de travail, il sera convenable de donner à la somme des surfaces des orifices d'appel la surface du cylindre par lequel l'air pénètre dans les canaux formés par les ailes. Ainsi, lorsque le ventilateur aspire par les deux joues, la distance de ces joues doit être égale au rayon de l'orifice, et seulement à la moitié de ce rayon quand l'appel a lieu par une seule joue.

548. D'après la théorie du ventilateur, il semble qu'il soit important que les bords latéraux des ailes s'approchent le plus près possible des joues; mais il n'en est pas ainsi : cette distance pourrait être très-grande sans que l'effet de la machine fût notablement modifié, pourvu toutefois que les deux cercles extrêmes des faces latérales fussent très-voisins des cercles décrits par les extrémités des bords extérieurs des ailes; seulement une partie de l'air appelé entrerait latéralement dans les canaux; mais pour la même vitesse de rotation on obtiendrait la même vitesse dans le canal d'appel, et on dépenserait le même travail.

549. Au lieu de rendre les joues du ventilateur immobiles, et de faire

parcourir leurs surfaces intérieures par les côtes des ailes, on pourrait fixer les ailes à une des joues, et faire mouvoir le système contre l'autre joue maintenue immobile (fig. 22 et 23, pl. 6).

550. On pourrait aussi fixer les ailes aux deux joues du ventilateur, et faire tourner à la fois tout le système; mais comme l'air d'appel est toujours obligé de parcourir un canal avant d'arriver au ventilateur, ce dernier devrait tourner autour de ce tuyau, et il faudrait empêcher l'air extérieur de passer dans le tambour; mais les différents modes de jonction occasionneraient des frottements qui pourraient être assez considérables, surtout pour de grandes vitesses. Le moyen qui présenterait probablement le moins d'inconvénient, consisterait à placer le ventilateur horizontalement, à fixer un cylindre court en métal à l'orifice d'appel, et à le plonger dans l'eau qui remplirait une rigole annulaire fixée au tuyau d'appel; le joint serait toujours étanche pendant le mouvement, à la condition pourtant que la hauteur du cylindre plongé dans l'eau fût plus grande que la dépression en eau qu'éprouve l'air dans le tuyau d'appel.

Ces deux dispositions, qui sont plus compliquées que celles que l'on emploie ordinairement, me paraissent sans avantage.

551. On a proposé récemment de donner aux ventilateurs aspirants la forme indiquée par la figure 7 (pl. 7). Les joues sont formées par deux cônes tronqués, qui s'appuient sur les cercles décrits par les extrémités des ailes, et ces dernières sont rectangulaires. On a prétendu que cette disposition était plus avantageuse que les dispositions ordinaires, mais je ne vois aucune raison pour qu'il en soit ainsi.

552. Les ventilateurs destinés à recevoir de l'air froid, et qui ne doivent pas tourner avec une très-grande vitesse, peuvent être en bois. Dans toutes les autres circonstances ils doivent être en métal.

553. Quant aux dimensions à donner au ventilateur, il faut remarquer qu'elles sont sans influence sur le travail de l'aspiration; mais qu'elles en ont une très-grande sur celui qui est consommé pour l'expulsion de l'air, car plus l'appareil sera petit, plus il faudra donner de vitesse à l'air à sa sortie. D'ailleurs, quand les appareils ont de petites dimensions, il faut donner à l'axe une plus grande vitesse de rotation, et la perte de travail qui provient des appareils employés dans ce but est très-grande; ainsi, sous tous les rapports, il est important de ne pas employer des

appareils trop petits. En général, il est utile que la somme des orifices d'appel ne diffère pas beaucoup de la surface de la section du tuyau d'appel, à moins que cette dernière ne soit très-grande.

554. On pourra déterminer avec une suffisante exactitude la vitesse qu'on doit donner à l'appareil, par la formule que nous avons donnée (535), pour les ventilateurs renfermant des canaux à section constante; on obtiendra ainsi une vitesse un peu trop grande; mais malgré cela il faudra encore calculer les engrenages et les diamètres des poulies, de manière à obtenir une vitesse relative plus grande, ou placer sur l'arbre plusieurs poulies de diamètres différents, attendu que les courroies qu'on emploie de préférence aux engrenages pour produire de très-grandes vitesses, glissent toujours plus ou moins sur les poulies, et produisent des vitesses réelles beaucoup plus petites que celles qui résulteraient du rapport des diamètres. La différence s'élève quelquefois à un tiers de la vitesse calculée.

555. On pourra évaluer approximativement le travail qui sera consommé par la machine, en le supposant égal à celui que dépenserait un ventilateur dont les canaux auraient une section constante : cette estimation dépassera certainement la réalité; mais comme il faudra ajouter à ce travail celui qui est absorbé par les appareils destinés à transmettre le mouvement du moteur, à produire l'accroissement de vitesse, et celui qui provient des ébranlements de l'air et des parties solides de la machine, sur lesquels on n'a que des indications bien vagues, l'erreur que l'on commettra sera réellement sans importance.

556. Les courroies qu'on emploie généralement pour augmenter la vitesse de rotation imprimée directement par le moteur, consomment beaucoup de travail employé à produire les flexions rapides de la lame autour des poulies. Les ingénieurs qui ont l'habitude des constructions des machines à grandes vitesses, estiment pour des vitesses de rotation de 1000 à 1500 tours par minute, la perte totale de travail, du moteur au dernier axe de rotation, à un quart du travail total.

557. Relativement à la perte de travail qui résulte de l'ébranlement de l'air et des parties solides de la machine, on ne sait absolument rien.

On peut cependant avoir une limite de la dépense totale de travail, due aux deux causes dont nous venons de parler, en la comparant à celle qu'exigent les ventilateurs soufflants, employés à alimenter les tuyè-

res des cubilots; car il n'est pas douteux que dans ces machines, qui sont disposées d'une manière très-défavorable, les pertes de travail de toute espèce ne soient plus grandes que dans les ventilateurs aspirants. Or, il résulte de l'expérience, que ces machines utilisent à peu près un tiers du travail dépensé, en comprenant dans l'effet utile, non-seulement le travail dû au mouvement de l'air, mais encore celui qui provient du frottement de l'air dans le tuyau de conduite. Ainsi, on peut estimer que le travail effectif $pV^2:2g$ sera au plus le tiers du travail dépensé.

558. Nous prendrons un exemple pour montrer comment, dans chaque cas particulier, on pourra calculer et la vitesse de rotation et le travail total.

Supposons un ventilateur ayant $1^m$ de diamètre, $0^m,12$ de largeur, un seul orifice d'appel de $0^m,50$ de diamètre, et communiquant avec un tuyau de tôle, ayant $50^m$ de longueur et 0,40 de diamètre, par lequel la machine doit appeler $1^{m.c}$ d'air par seconde.

La section du canal étant de $0^m,125$, la vitesse que l'air y prendra sera égale à $1:0,125=8$. Alors on aura

$$H=\frac{8^2}{2g}+\frac{KLv^2}{D}=3,26+\frac{0,0025\times 50\times 64}{0,4}=23,26.$$

En considérant les canaux du ventilateur comme ayant une section constante, la somme des surfaces des orifices de sortie sera $0^m,19$; la vitesse relative de l'air dans les canaux sera $1:0,19=5,26$, et la hauteur d'air correspondante sera $(5,26)^2:2g=1,37$. Alors, en négligeant les frottements dans la machine elle-même, on aura

$$\frac{V^2}{2g}=H+h=23,26+1,37=24,63,$$

d'où l'on tire

$$V^2=483,24;\quad \text{et}\quad V=22.$$

Le nombre de tours sera alors de 7 par seconde et de 420 par minute. Le travail dépensé par la machine sera

$$\frac{2pV^2}{2g}=\frac{2\times 1,3\times 483,24}{19,62}=64^{k.m};$$

ce qui correspond à 0,85 de la force d'un cheval-vapeur; sans y comprendre le travail perdu par les appareils de transmission du mouvement et par les ébranlements; il faudrait alors estimer le travail à dépenser à 2,5 chevaux-vapeur.

Dans cet exemple nous avons négligé le frottement de l'air dans le ventilateur; mais il est facile de voir qu'il est réellement peu important; car en considérant les canaux comme ayant dans toute leur étendue la section qu'ils ont à l'origine, et en les supposant au nombre de 6, on trouve que la hauteur d'air correspondante au frottement est seulement de $1^{m}$, et le travail de $1^{k.m.},3$.

*Ventilateurs soufflants.*

559. Ces ventilateurs sont uniquement employés à remplacer les soufflets et les machines soufflantes à piston dans les cubilots. Ils sont disposés de la même manière que les ventilateurs aspirants dont nous venons de parler; seulement, les orifices du centre s'ouvrent dans l'air, et la circonférence du tambour est fermée de toute part, excepté dans une certaine étendue en communication avec le tuyau qui conduit l'air comprimé au fourneau.

560. Les figures 8, 9, 10, 11, 12, 13 et 14 (pl. 7) représentent un ventilateur soufflant appliqué à des fourneaux destinés à fondre la fonte dans les ateliers de MM. Sudds Barker et compagnie, de Rouen. La plate-forme et les joues du ventilateur sont en fonte. Sur les deux joues se trouvent des barres qui supportent les paliers. L'arbre est en fer, les bras en fonte d'une seule pièce, qui s'ajuste sur l'axe au moyen d'une rainure intérieure qui embrasse une saillie correspondante de l'axe. Les palettes sont en fer forgé, de 8 millimètres d'épaisseur. Les six bras sont consolidés par un anneau en fer fixé sur chaque bras par un boulon rivé. Ces palettes sont inclinées sur les rayons.

AB (fig. 8, 9 et 10), massif en charpente ou en maçonnerie servant de base ou de plate-forme au ventilateur. D, forte plaque en fonte fixée sur le massif AB par les quatre boulons *d*. EFG, portion circulaire du contour des joues formant les parois latérales de la caisse du ventilateur. *efg*, ouvertures circulaires ménagées au centre de chacune des joues de la caisse, par lesquelles se fait l'aspiration. E'G', ouverture par laquelle l'air comprimé s'échappe dans le canal destiné à le recevoir pour le distribuer aux foyers. I, support à nervures réservé à la fonte, contribuant à soutenir les consoles KK, et à leur donner plus de stabilité. KK, consoles à nervures saillantes réservées à la fonte dans les ouvertures circu-

laires *efg*. LL, paliers fixés avec des coins sur les consoles KK. MM, arbre de la roue. *m*, poulie montée sur le prolongement de l'arbre MM. N, moyeu portant les six bras P avec lesquels il est fondu. *n*, rainure taillée dans le trou intérieur du moyeu N et servant à le fixer sur l'arbre MM. P, bras de la roue (fig. 13 et 14). *pp'*, extrémité des bras; elle est élargie pour que les palettes puissent y être fixées plus solidement, et en même temps elle est inclinée dans un plan perpendiculaire à l'arbre, pour que le plan des palettes ne passe pas par le centre. Q, anneau en fer forgé qui se fixe sur les six bras de la roue pour les lier et les consolider.

Le ventilateur fait 1000 tours à la minute; ainsi les extrémités des palettes parcourent environ 3000 mètres par minute ou 50 mètres par seconde. La force nécessaire pour faire mouvoir le ventilateur est estimée à 4 chevaux. Le vent qu'il produit suffit pour alimenter deux fourneaux qui fondent chacun 2000 kilogrammes à l'heure; l'air arrive à chacun des foyers par quatre orifices de 10 à 11 centimètres de diamètre.

561. M. Combes, en partant des formules qu'il a établies pour déterminer les formes et les dimensions des ventilateurs aspirants, a été conduit à de nouvelles dispositions de ventilateurs soufflants. Dans le ventilateur soufflant de M. Combes, les palettes sont courbes, et leur courbure est déterminée par les mêmes conditions que pour les ventilateurs aspirants. L'air s'écoule constamment par les canaux formés par les ailes, dans un canal annulaire qui règne autour du cylindre décrit par les extrémités des ailes, et qui s'agrandit progressivement et dans le sens de la rotation des ailes, de l'un des bords du tuyau de départ jusqu'à l'autre, où il a une section égale à celle de ce tuyau; enfin, le tuyau d'écoulement est tangent au cylindre décrit par les extrémités des ailes.

562. La courbure des ailes à leur origine a pour objet d'éviter leur choc contre les veines d'air; la courbure des ailes à leur extrémité a pour objet de verser l'air dans le canal annulaire avec la plus petite vitesse possible, attendu que le travail dû à cette vitesse est complétement perdu; enfin, le canal annulaire a pour effet de produire un écoulement constant et continu de l'air par les canaux pendant toute la rotation.

563. Mais comme il est peu probable que le choc de l'air contre les

ailes à leur origine augmente notablement le travail dépensé; que d'ailleurs l'économie de travail qui pourrait résulter de la courbure des ailes à la partie centrale de la machine, disparaîtrait en grande partie pour des vitesses de rotation plus grandes ou plus petites que celles pour lesquelles la courbure a été calculée; et qu'enfin il est fort douteux, par les mêmes raisons que pour les ventilateurs aspirants, que la courbure des ailes à l'autre extrémité soit réellement avantageuse; je pense que, jusqu'à ce que des expériences aient bien constaté l'avantage de l'emploi des ailes courbes, il faut s'en tenir à l'ancienne disposition, mais en adoptant l'excentricité de l'enveloppe, attendu que l'efficacité de cette disposition ne peut pas être mise en doute. D'après cela, le ventilateur aurait la forme indiquée par les figures 15 et 16 (pl. 7).

564. On pourrait déterminer les dimensions du ventilateur par les mêmes considérations que pour les ventilateurs aspirants (535).

565. Pour déterminer la vitesse de rotation qu'il faudrait donner à la machine pour produire un effet donné, désignons par H la hauteur d'air qui produirait l'écoulement dans le tuyau de conduite, et remarquons que dans ces sortes d'appareils la vitesse de l'air dans le canal annulaire est toujours très-petite relativement à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes; alors, en négligeant les frottements de l'air dans le ventilateur, on aura sensiblement $V^2 : 2g = H$. Quant au travail dépensé, il se composera de celui qui résulte de la compression produite dans le canal annulaire, qui est représenté par $pV^2 : 2g$, et de celui qui provient de la vitesse tangentielle imprimée à l'air, et qui est aussi $pV^2 : 2g$; ainsi le travail total consommé par la machine sera $2pV^2 : 2g$, comme dans les ventilateurs aspirants. Et à ce travail consommé par la machine, il faudra encore ajouter celui qui est absorbé par les transformations de mouvement et par les ébranlements de toute espèce produits dans l'air et dans les parties solides. En ayant égard à toutes ces circonstances, il ne faudrait pas compter sur un travail effectif $pV^2 : 2g$ qui dépassât le tiers du travail moteur.

### *Ventilateurs aspirants et soufflants.*

566. Ces ventilateurs ne diffèrent des derniers que nous venons d'étudier, qu'en ce que l'air d'appel, au lieu d'entrer librement dans le ven-

tilateur, parcourt un canal plus ou moins long avant d'y arriver.

C'est, par exemple, le cas d'un ventilateur qui serait employé à remplacer l'action d'une cheminée. L'appareil, placé au bout du fourneau, appellerait l'air qui aurait passé à travers la grille et dans le canal qui circule autour du corps à chauffer, et le pousserait dans ceux où l'air brûlé doit être refroidi, et de là dans la cheminée.

567. En plaçant une cheminée tangente à la circonférence du tambour, les figures 1re et 2 (pl. 7) représenteraient un ventilateur destiné à produire un tirage mécanique. Il serait avantageux de donner au ventilateur la forme représentée par les figures 15 et 16 (pl. 7).

568. Les ventilateurs aspirants et soufflants doivent être disposés comme ceux dont nous avons parlé précédemment, en évitant les changements brusques de section dans les tuyaux d'appel et de sortie de l'air, ainsi que les changements brusques de direction.

569. Du reste, la vitesse de rotation et la dépense d'air seraient exactement les mêmes que si le ventilateur était soufflant et placé à l'extrémité d'appel de la conduite. Ainsi, en désignant par H et H′ les hauteurs d'air nécessaires pour produire le mouvement de l'air dans le tuyau d'appel et dans celui par lequel l'air s'écoule, en supposant que ces quantités soient très-grandes relativement à la hauteur d'air correspondante à la vitesse de l'air dans le ventilateur, on aura à peu près $V^2 : 2g = H + H'$, et pour le travail dépensé, $2pV^2 : 2g$; et pour ces machines, comme pour celles que nous avons déjà examinées, il ne faudrait pas compter sur un travail utile qui dépassât le tiers de celui qui est fourni par le moteur.

570. Les ventilateurs soufflants et aspirants ne sont certainement pas de bonnes machines, du moins sous le rapport de l'effet utile qu'ils produisent; mais leur simplicité, l'absence de tout ajustement les font préférer à d'autres machines qui consommeraient moins de travail, mais qui exigeraient plus de soins, plus de réparations, et qui seraient d'un prix plus élevé. Ces machines sont surtout très-utiles quand le travail nécessaire au mouvement de l'air est très-petit, car alors ces machines sont presque les seules qu'on puisse employer.

## § 3. — VIS D'ARCHIMÈDE.

571. La vis d'Archimède peut être employée de différentes manières. Lorsqu'une vis, disposée comme celles qui servent aux épuisements, plonge dans l'eau par sa partie la plus basse, et qu'on donne à la vis un mouvement de rotation opposé à celui qui élèverait l'eau, l'air descend sous l'eau et se dégage autour de l'orifice plongé. Alors, si la surface de l'eau qui se trouve au-dessus de l'extrémité inférieure de la vis était recouverte d'une cloche, l'air y serait comprimé et pourrait être dirigé dans le lieu où il devrait être utilisé. Une machine semblable est établie dans les ateliers de M. Kœchlin de Mulhausen; elle est destinée à donner le vent à un cubilot.

572. On peut aussi employer, pour aspirer et pousser l'air, un tuyau renfermant un seul pas de vis mobile; chaque tour de la vis fait sortir de l'appareil un volume d'air ayant pour base la section du cylindre et pour hauteur celle du pas de la vis. Cette machine est extrêmement simple, mais le frottement de l'air y est beaucoup plus grand que dans les ventilateurs à force centrifuge. Une machine de ce genre a été récemment appliquée à la ventilation d'une mine de houille; mais elle a donné de très-mauvais résultats, comme il était facile de le prévoir.

573. On pourrait cependant employer des machines analogues dans certaines circonstances où la dépense de travail est peu importante, et où il est nécessaire de placer l'appareil dans le tuyau même d'écoulement. Le mouvement de rotation imprimé à l'air au sortir de l'appareil pourrait même être très-avantageux quand l'air doit communiquer sa chaleur à l'enveloppe ou être échauffé par elle, parce que toutes les parties de la veine d'air seraient mises successivement en contact avec la surface du tuyau, ce qui n'arrive pas quand la vitesse de chaque veine élémentaire est parallèle à l'axe, et cette circonstance favoriserait évidemment le refroidissement ou l'échauffement de l'air.

574. Indépendamment des ventilateurs à force centrifuge et de la vis d'Archimède, on emploie comme machines aspirantes et soufflantes, des appareils à membranes flexibles, des trompes et des pompes. Nous ne décrirons point ces appareils qui sont du domaine de la métallurgie; mais quand il sera question de la ventilation des mines, nous nous oc-

cuperons des grandes machines à piston qui sont employées dans quelques mines de houille de la Belgique.

### § 4. — MOUVEMENT DE L'AIR PRODUIT PAR UNE INJECTION DE VAPEUR.

575. Lorsqu'on introduit un jet de vapeur dans un tuyau ouvert par les deux bouts, de manière que le jet soit dirigé suivant l'axe, la vapeur produit une circulation plus ou moins rapide de l'air dans le tuyau. Manoury-Dectot paraît avoir employé le premier les jets de vapeur pour produire la ventilation; depuis, ce même moyen a été employé dans diverses circonstances par M. Pelletan. C'est au moyen d'un jet de vapeur dans la cheminée des chaudières des locomotives qu'on est parvenu à produire le tirage nécessaire à l'énorme consommation de combustible de ces machines.

576. On n'a fait encore aucune expérience pour déterminer le rapport entre le travail du jet de vapeur et celui qu'exige le mouvement de l'air qu'il produit; mais il est probable que tout le travail résultant du jet de vapeur est utilisé, moins cependant celui qui provient de la détente, car la détente a lieu dans tous les sens. D'après cela, en désignant par $p$ le poids de la vapeur écoulée par seconde, par $v$ la vitesse d'écoulement, le travail de la vapeur sera $pv^2:2g$, l'unité étant le kilogramètre. On voit alors que le travail produit augmentera très-rapidement avec $v$, et qu'il sera toujours avantageux d'employer la vapeur sous une grande pression, attendu que la quantité de chaleur absorbée par la vaporisation de 1 kilogramme d'eau, paraît être indépendante de la pression de la vapeur. Supposons, par exemple, que l'on brûle 5 kilog. de houille par heure, et qu'on produise par heure 25 kilog. de vapeur à deux atmosphères; l'orifice d'écoulement ayant une surface convenable, ainsi que la section du tuyau de conduite, la vapeur sortira sous une pression de deux atmosphères; la densité de la vapeur à deux atmosphères étant de 0,00111, la hauteur génératrice de la vitesse sera de $10^m,32 : 0,00111 = 9297^m$, le poids de vapeur écoulé par seconde étant $25^k : 3600 = 0,007$, et le travail produit sera égal à $9297.0,007 = 65^{km.}$, un peu moindre que le travail d'un cheval-vapeur dans une machine ordinaire. Le tableau suivant renferme le travail produit par l'écoulement de 25 kilog. de vapeur par heure sous différentes pressions :

| PRESSIONS en atmosphères. | TEMPÉRATURE de la vapeur. | DENSITÉ de la vapeur. | HAUTEUR génératrice de la vitesse. | TRAVAIL produit. |
|---|---|---|---|---|
| | | | | k. m. |
| 1 1/2 | 112 | 0,00085 | 6070 | 42 |
| 2 | 121 | 0,00111 | 9297 | 65 |
| 2 1/2 | 129 | 0,00136 | 11907 | 83 |
| 3 | 135 | 0,0016 | 12900 | 90 |
| 3 1/2 | 140 | 0,00185 | 14383 | 100 |
| 4 | 145 | 0,0021 | 14743 | 103 |
| 4 1/2 | 149 | 0,0023 | 15904 | 109 |
| 5 | 153 | 0,0025 | 16512 | 115 |

On voit, d'après cela, qu'à la pression de $2\frac{1}{2}$ atmosphères l'effet produit commence à dépasser celui qu'on obtiendrait avec une machine consommant 5 kilog. de houille par heure et par cheval.

577. Ce mode de tirage, qui est en même temps économique et d'une extrême simplicité, puisqu'il n'exige qu'une chaudière à vapeur, doit être souvent préféré à tous les autres moyens, d'autant plus que, par son usage, on sera plus maître de faire varier le tirage que quand on emploie des machines dont l'effet ne peut croître que par une augmentation de vitesse qui n'est pas toujours sans inconvénients, et qui est très-bornée. D'ailleurs, pour produire un puissant tirage momentané, on pourra faire fonctionner la chaudière en activité et celle de rechange, et on pourra en outre se ménager pour chacune les moyens de produire beaucoup plus de vapeur en brûlant plus de combustible, quoique moins utilement.

578. S'il n'y avait pas d'inconvénients à mettre l'air appelé en communication avec le foyer, on pourrait alimenter la combustion par l'air d'appel et rejeter la fumée dans la cheminée.

579. Il serait important de conduire la vapeur à l'orifice de dégagement par un tuyau d'un grand diamètre, afin que dans le trajet la vapeur n'éprouvât que peu de frottement, et que l'orifice d'écoulement eût les dimensions convenables pour que la vapeur, à sa sortie, prît sensiblement la vitesse qui correspond à la pression dans la chaudière.

580. Il serait aussi très-important d'introduire la vapeur dans la che-

minée par plusieurs jets espacés de manière que la vapeur dilatée remplît toute la cheminée à une petite distance des orifices. On conçoit facilement qu'il est indispensable que la vapeur agisse dans toute la section, autrement il se ferait un appel de haut en bas dans la partie de la cheminée sur laquelle la vapeur n'agirait pas directement.

581. On a prétendu que, dans le tirage par la vapeur, on n'obtenait tout l'effet qui résulte de la force vive de la vapeur, qu'autant que l'air était à une température assez élevée pour qu'il n'y ait pas condensation de vapeur; mais je ne pense pas que cette circonstance ait une influence bien sensible; cependant il serait utile de faire quelques expériences à ce sujet.

582. On a prétendu aussi, d'après des expériences faites sur les locomotives, que, par l'intermittence du jet, on produisait un plus grand effet utile que par un jet continu; en supposant que cela fût exact, il faudrait voir si, dans les expériences qui ont été faites, la tension de la vapeur n'était pas plus grande avec les intermittences qu'elle ne l'eût été par un jet continu.

On a reconnu, par des expériences faites sur des locomotives, qu'il est avantageux de faire sortir la vapeur par des orifices percés en minces parois dans des surfaces planes.

583. Le tirage à la vapeur serait surtout avantageux dans les circonstances où l'air devrait être complétement refroidi après l'injection de vapeur, parce qu'alors on retrouverait une partie de la chaleur employée à produire la vapeur.

584. Il y aurait un grand avantage à chauffer la vapeur après sa formation, en la faisant circuler dans des tuyaux placés dans le canal qui conduit l'air brûlé de la chaudière à la cheminée; on obtiendrait ainsi un grand accroissement de vitesse avec une moindre dépense de vapeur en poids. Cette disposition serait surtout très-avantageuse pour la ventilation des mines.

# CHAPITRE VII.

## DES FOYERS.

585. Les premiers foyers qui ont été employés consistaient simplement dans un espace plus ou moins étendu, placé au-dessous du corps qu'on voulait échauffer, et dans lequel on accumulait le combustible. Plus tard, lorsqu'on reconnut la nécessité d'envelopper le foyer pour économiser le combustible, les foyers se composèrent d'un espace fermé, pourvu d'une seule ouverture pour l'introduction de l'air et du combustible. Ce ne fut que longtemps après qu'on imagina les grilles sur lesquelles on place le combustible. Il est probable que leur découverte a été provoquée par l'emploi de la houille, qui brûle mal sans grille.

586. Un foyer se compose maintenant de l'ouverture qui donne accès à l'air, d'un espace où se réunissent les cendres, de la grille sur laquelle on place le combustible, et d'un espace plus ou moins étendu, dans lequel se développe la flamme. Ces différentes parties ne sont cependant pas toujours distinctes, comme nous le verrons plus tard.

Les foyers ont des formes très-variées, non-seulement à cause des qualités différentes des combustibles, mais pour un même combustible, suivant l'effet qu'on veut obtenir. Nous les avons divisés en différentes classes que nous examinerons successivement.

### § 1. — DES FOYERS A FLAMME DROITE.

587. Les foyers à flamme droite, sans grille, ont un très-grand désavantage sur les foyers à grille, parce que le courant d'air arrivant latéralement, une grande partie de cet air ne traverse pas le combustible, et diminue infructueusement la température de l'air chaud qui a servi

à la combustion. Ainsi, ces foyers, quoique d'une construction beaucoup plus simple que les autres, doivent être entièrement proscrits toutes les fois que l'économie du combustible doit être prise en considération, ou que d'autres circonstances ne rendent pas leur emploi indispensable; d'ailleurs, ils ne pourraient point servir pour la houille, du moins la combustion y serait toujours languissante et imparfaite.

588. *Ouverture qui donne accès à l'air.* On donne ordinairement à l'orifice d'accès de l'air une section égale à celle des carneaux; mais il n'y a jamais d'inconvénient à la rendre beaucoup plus grande, surtout si la prise d'air est extérieure, et si l'air n'arrive dans le foyer qu'après avoir parcouru un long canal.

Il est toujours utile de garnir l'ouverture du cendrier d'une porte qui puisse fermer hermétiquement. Cette porte et le registre de la cheminée, dont nous avons parlé (452), permettent d'empêcher l'air de passer à travers le fourneau pendant la cessation du travail, de s'opposer ainsi au refroidissement du fourneau, et par conséquent de faire une économie notable de combustible.

589. En général, on peut donner aux ouvertures d'accès une position et une direction quelconques. La prise d'air peut avoir lieu en dedans ou en dehors de l'atelier; le premier cas est le plus général. L'orifice du cendrier est alors placé au-dessous de la porte du foyer, ou sur une autre face du fourneau; quelquefois il est placé au niveau du sol, et il est fermé par une grille en fer; mais cette disposition n'est jamais employée que pour les foyers à bois, attendu qu'elle ne permet pas de nettoyer les grilles.

Quelquefois on introduit l'air par plusieurs ouvertures pratiquées sur les faces du fourneau; cette disposition compliquée est sans aucun avantage lorsque le fourneau se trouve dans un atelier clos, et que les orifices s'ouvrent dans l'atelier même.

590. Lorsque la prise d'air se fait au dehors de l'atelier, il en résulte plusieurs avantages importants : 1° le tirage, toutes choses égales d'ailleurs, est plus fort, parce qu'en général la température des ateliers étant plus élevée que celle de l'air extérieur, la pression sur l'ouverture d'un canal débouchant au dehors est plus grande que celle qui se manifesterait sur une ouverture située dans l'atelier; 2° lorsque la prise d'air est intérieure, les vents dirigés en sens contraire de l'introduction de l'air dans l'atelier

diminuent le tirage, et cette diminution est d'autant plus grande que le tirage est plus faible, tandis que, par une prise d'air extérieure, on peut détruire complétement cette influence. Lorsqu'on peut prendre l'air dans un lieu bien découvert, à une distance suffisante des bâtiments, les vents sont sans influence sur le tirage. Dans le cas contraire, il faudrait multiplier les prises de manière que dans toutes les directions possibles des vents, il y en eût une qui fût favorable : quatre suffiraient; mais comme il est rare que dans un même lieu les vents violents aient plus de deux directions différentes, en général deux prises suffisent, et si l'ouverture de l'atelier était déjà dans une de ces directions, une seule serait nécessaire, avec une prise dans l'intérieur de l'atelier. Nous avons décrit (509-510) des appareils qui rendent toujours les vents favorables à l'introduction de l'air dans les foyers par un seul canal. Quand la prise d'air est extérieure, le canal doit avoir une grande section, surtout s'il est très-long, afin que l'air n'y prenne qu'une faible vitesse, et que le tirage ne soit pas sensiblement diminué.

591. *Du cendrier.* Le cendrier est l'espace libre qui se trouve au-dessous de la grille; il est pourvu d'un large orifice par lequel s'introduit l'air froid nécessaire à la combustion. La grandeur de cet espace est entièrement arbitraire, il faut seulement qu'il ne soit point étranglé, et que sa plus petite section soit suffisante pour fournir la quantité d'air froid nécessaire à la combustion.

592. Depuis quelque temps on a introduit dans la construction des cendriers une innovation qui est utile dans certaines circonstances. Le fond du cendrier est recouvert d'une couche d'eau de quelques centimètres; un petit tuyau amène constamment l'eau froide jusqu'au fond du bassin, et un autre de même diamètre conduit au dehors le liquide de la surface, qui est le plus échauffé. Ce petit bassin d'eau, en absorbant la chaleur rayonnante du foyer de haut en bas, diminue beaucoup la température de la partie inférieure des grilles, ce qui les conserve plus longtemps, et empêche qu'elles ne soient obstruées aussi fortement par l'adhérence des scories; de plus, la vapeur d'eau qui se dégage et qui est décomposée en traversant le foyer, donne plus de longueur à la flamme, et la maintient lorsque le charbon, transformé en coke, n'en produirait plus par un courant d'air sec : cette disposition a déjà été employée avec avantage dans plusieurs usines.

593. *Des grilles.* Les grilles sont formées de barres de fer ou de fonte placées parallèlement. Leur épaisseur dépend de leur longueur; et leur écartement de la grosseur des morceaux de combustible, car ces intervalles ne doivent laisser passer que les cendres. Pour les grands foyers, on donne généralement aux barreaux une largeur de 3 centimètres et on laisse entre eux un intervalle d'environ 1 centimètre : il est cependant avantageux de diminuer beaucoup l'écartement des barreaux quand on doit brûler des combustibles qui se divisent dans le foyer à mesure que la combustion fait des progrès et dont une partie pourrait tomber avec les cendres.

594. *Dimensions des grilles.* Tredgold, dans son traité des machines à vapeur, indique 9 décimètres carrés de grille par force de cheval; ce serait, en comptant 5 kilogr. de houille par cheval, $5:9=0^{k},55$ par décimètre carré. Il arrive au résultat que nous venons d'énoncer par un calcul fort extraordinaire. Je rapporterai à ce sujet les propres expressions de M. Millet, traducteur de l'ouvrage de Tredgold, qui a cru devoir mettre une note à l'étrange article dont il est question. « Dans ce « calcul, Tredgold paraît prendre la hauteur du cendrier comme la « hauteur génératrice de la vitesse; ce qui est évidemment erroné, « puisque le tirage est principalement produit par la cheminée et par « la colonne d'air brûlé qu'elle contient, et qui s'y trouve à une tem- « pérature beaucoup plus élevée que celle du cendrier. Il arrive cepen- « dant à un résultat assez conforme à la pratique; mais c'est en faisant, « dans le cours du calcul, des hypothèses non moins fautives, qui forment « une compensation en sens contraire. »

595. Dans la plupart des chaudières à vapeur, alimentées par la houille, les grilles ont des surfaces qui correspondent à peu près à une consommation de 1 kilogramme de combustible par décimètre carré et par heure. Cependant il existe des foyers à grilles beaucoup plus petites et d'autres à grilles beaucoup plus grandes; les limites extrêmes correspondent à des consommations de houille de $1^{k},5$ à $0^{k},3$ par décimètre carré et par heure, et on n'a pas reconnu de différences notables dans les effets utiles produits par ces foyers. Il paraîtrait, d'après cela, qu'il en serait des combustibles qui brûlent avec flamme comme de ceux qui brûlent sans flamme, qu'en modifiant convenablement le tirage, on pourrait produire le même effet utile

en brûlant ces combustibles sur des grilles d'une étendue quelconque.

Il y a même quelques faits qui semblent favorables aux foyers à grandes grilles. Dans les petites chaudières de Lemare, dont les résultats rapportés (228-229) sont si satisfaisants, les grilles étaient très-grandes; dans les grandes chaudières à vapeur du Cornwall, qui produisent de très-bons effets, les grilles sont énormes.

596. Les ingénieurs qui ont acquis une grande expérience dans la construction des foyers, admettent, en général, que les grandes grilles sont favorables à l'économie du combustible, mais qu'elles sont plus difficiles à diriger, et qu'elles présentent plus d'inconvénients que les autres, lorsque le chauffage n'est pas uniforme.

Il serait bien à désirer que des expériences, faites avec soin et sur une grande échelle, décidassent la question. En attendant, je pense que pour les grands foyers, et surtout pour ceux dans lesquels on ne doit pas brûler constamment la même quantité de houille, il est prudent de s'en tenir aux dimensions habituelles. Mais il n'est pas douteux que pour les foyers à coke, à houille sèche et à anthracite, on obtiendra le même effet utile avec des foyers de dimensions très-différentes, pourvu que le tirage et l'épaisseur de la couche de combustible soient convenables.

Les grandes grilles deviennent indispensables dans deux circonstances: 1° quand, par la nature du métal de la chaudière, les foyers ne doivent pas avoir une température très-élevée; 2° quand le combustible laisse sur la grille des résidus volumineux qui doivent être enlevés après un certain temps.

597. Pour les grilles ordinaires et pour la houille, l'épaisseur de la couche de combustible est à peu près de 0,05 à 0,08, suivant la grosseur des morceaux. Pour les foyers à combustibles qui brûlent sans flamme, et dont les grilles correspondent à une consommation de $0^k,6$ à 0,75 par décimètre carré et par heure, l'épaisseur de la couche varie de $0^m,20$ à $0^m,30$.

598. Pour les foyers à bois, les grilles doivent être beaucoup plus petites que pour les foyers à houille, d'abord parce qu'il faut moins d'air pour brûler 1 kilogramme de bois que pour brûler 1 kilogramme de houille, ensuite parce que les ouvertures ne sont pas sujettes à s'obstruer. D'après les observations de M. Édouard Kœchlin, il faut 1 mètre carré de grille, ayant un quart d'intervalle libre, pour brûler 350 kilog.

de chêne vieux par heure, ce qui fait à peu près 3 décimètres carrés pour 10 kilogrammes de bois; c'est le nombre que nous admettrons.

599. Examinons maintenant la construction des grilles. Généralement les barreaux sont en fonte et ont la forme indiquée par les figures 1, 2, 3, 4, 5 (pl. 8); leur hauteur est plus grande au milieu que vers les extrémités, afin qu'ils résistent mieux à la flexion; leur épaisseur va en diminuant de haut en bas, afin de faciliter l'accès de l'air, la chute des scories et le dégorgement de la grille par une barre de fer plate et recourbée qu'on introduit en dessous à travers les barreaux; ils sont garnis aux deux extrémités et au milieu d'appendices, dont l'épaisseur est égale à la moitié de l'intervalle qui doit les séparer, et qui ont de 2 à 5 millimètres; souvent on ne met des appendices que d'un côté (fig. 3). La figure 4 représente l'ajustement des barreaux; ils reposent par leurs extrémités sur des barres de fonte ou de fer fixées dans la maçonnerie. L'épaisseur de chaque barreau à la partie supérieure varie de 15 à 30 millimètres, et, pour 1 mètre de longueur, la hauteur au milieu est de 8 à 10 centimètres.

600. Ordinairement les grilles sont horizontales, mais on les incline quelquefois vers le fond du foyer; cette disposition est utile pour les combustibles qui produisent beaucoup de flamme (fig. 14 et 18, pl. 8).

601. Pour faciliter le dégagement des scories, on a imaginé la disposition indiquée figure 14. La grille est inclinée, et au delà de son extrémité se trouve une espèce de trémie, dans laquelle on repousse les scories qu'on fait tomber à volonté dans le cendrier, au moyen d'une coulisse que le chauffeur manœuvre facilement.

602. Lorsque les charbons sont très-collants, et qu'ils encrassent trop facilement les grilles, on emploie la disposition indiquée par les figures 11, 12, 13 (pl. 8); la grille est formée de barreaux de fer carrés qui dépassent la face du fourneau; on peut alors, en ouvrant la porte, agiter successivement chacun d'eux, séparer ou faire tomber dans le cendrier les scories qui y sont attachées. Cette disposition est principalement employée pour les foyers des fourneaux à réverbère, dans lesquels la température est plus élevée que dans ceux des chaudières à vapeur, et dont les grilles s'encrassent plus facilement.

603. On a imaginé d'employer des grilles mobiles qui sont chargées d'une manière continue; des grilles creuses, dans lesquelles on échauffe

l'air qui doit alimenter la combustion, ou qui reçoivent de la vapeur qui se mêle à l'air d'alimentation; nous parlerons de tous ces appareils après avoir décrit les foyers fumivores.

604. *Du foyer proprement dit.* L'espace qui est au-dessus de la grille doit avoir une étendue suffisante pour contenir le combustible, et pour permettre à la flamme de se développer.

La quantité de combustible que l'on doit accumuler sur la grille est très-difficile à déterminer, car on se trouve entre deux écueils qu'il faut également éviter : si la quantité de combustible est trop petite, l'air qui passera à travers la grille ne sera pas assez divisé, une grande partie échappera à la combustion, et en outre il faudra alimenter le foyer à de plus courts intervalles, circonstances qui toutes deux concourent à diminuer l'effet utile du combustible; d'un autre côté, si l'épaisseur de la couche de combustible est trop grande, l'air la traversera difficilement, et il se dégagera beaucoup de fumée, beaucoup de gaz combustibles, et seulement de l'oxyde de carbone, quand le combustible ne sera pas décomposable par la chaleur seule.

On conçoit, d'après cela, qu'il est impossible de donner une règle précise sur la hauteur du combustible qu'on peut accumuler sur la grille, attendu que cette hauteur devra dépendre non-seulement de la nature, mais de la grosseur des morceaux de combustible. Dans tous les cas, on devra augmenter l'épaisseur de la couche jusqu'à ce qu'on observe un accroissement de consommation de combustible pour produire le même effet; on obtiendra ainsi deux avantages importants : une alimentation moins fréquente, et un effet utile plus grand.

605. Pour les dimensions de grilles indiquées précédemment, l'épaisseur de la couche de combustible doit être, comme nous l'avons déjà dit, de 5 à 8 centimètres pour la houille, et de 20 à 30 centimètres pour le coke.

606. Quant à l'espace qui doit se trouver au delà du combustible, entre la grille et la chaudière, il n'est point arbitraire : si la chaudière était trop rapprochée, comme elle est à une température beaucoup plus basse que la flamme, elle l'éteindrait et par suite on obtiendrait de la fumée et une mauvaise combustion; si, au contraire, elle était trop éloignée, elle ne recevrait qu'une partie du rayonnement, et il y aurait encore une perte d'effet utile, parce que l'air chaud sortirait à une température trop élevée.

607. On a reconnu par expérience que, pour les foyers à houille, il faut mettre, entre la grille et la chaudière ou le fond des bouilleurs, une distance de 30 à 35 centimètres, et 40 pour les très-grands foyers. Cette distance doit être de 70 à 75 centimètres dans les foyers à bois, de 50 dans les foyers à tourbe, et de 60 dans ceux où l'on brûle du coke.

608. Mais si la chaudière devait être portée à une température très-élevée, peu différente de celle que prend l'air chaud à sa sortie du foyer, il faudrait, au contraire, placer la chaudière au milieu de la flamme, et négliger presque la circulation de l'air chaud qui, même dans certains cas, pourrait la refroidir; la combustion ne serait point ralentie à cause de la haute température de la chaudière. Il y aurait alors une grande perte de chaleur, mais elle serait inévitable, parce que, comme nous l'avons déjà dit, l'air ne peut s'échapper à une température inférieure à celle du corps chauffé, et par conséquent la perte de chaleur serait d'autant plus grande, que la température de la chaudière serait plus élevée.

609. J'ai eu plusieurs fois l'occasion de reconnaître qu'en effet on économise beaucoup de combustible en rapprochant la chaudière de la grille quand elle doit rougir; et qu'au contraire il y a économie à l'éloigner, du moins jusqu'à une certaine limite, lorsqu'elle ne doit atteindre qu'une température peu élevée au-dessus de 100°.

610. M. de Valcourt rapporte que, dans une machine à vapeur qu'il avait établie à la Nouvelle-Orléans pour faire mouvoir des scies, les chaudières étaient chauffées au bois, et que la grille était d'abord à 3 pieds et demi au-dessous de la chaudière; la machine marchait bien, les deux scies donnaient 100 coups par minute, et sciaient chacune 10 pieds de planches d'un pied de largeur en trois minutes; il ajoute qu'il essaya un jour de relever la grille de 6 pouces, et que la machine, avec le plus grand feu qu'on pût faire, ne put alors faire marcher qu'une scie; on redescendit la grille à sa première place, et les deux scies furent mises en mouvement comme auparavant.

611. Les foyers à bois devant avoir une grande hauteur, on les dispose souvent d'une manière particulière. Les figures 15, 16 et 17 (pl. 8) représentent une forme très-commode de foyer à bois; la grille est horizontale et peu élevée au-dessus du sol; l'air s'introduit à travers une grille placée au niveau du sol, en avant du fourneau, et le foyer est

garni de deux portes, l'une supérieure pour alimenter le foyer, l'autre inférieure qui sert à le vider. On emploie aussi très-souvent la disposition indiquée figure 18. On peut prendre 40 centimètres pour la distance de l'origine de la grille à la chaudière, et 80 pour celle de son autre extrémité. Des dispositions analogues peuvent être employées pour les foyers à tourbe et à coke.

612. Les foyers sont toujours encaissés latéralement et au fond. Quelquefois on élève à une assez grande hauteur le mur du fond, afin d'obliger la flamme et l'air brûlé à passer contre la chaudière dans un espace assez étroit. Cette disposition est sans avantage; elle a l'inconvénient de diminuer l'étendue de la partie de la chaudière qui reçoit le rayonnemens du foyer, et de produire de promptes dégradations dans la partie de la chaudière qui se trouve au-dessus du feu. Ce dernier inconvénient s'est manifesté d'une manière très-marquée sur les chaudières de la manufacture de tabac à Paris, et depuis que l'on a abaissé le mur au niveau du sol du carneau, les chaudières ont cessé d'éprouver les fréquentes altérations dont on avait longtemps, mais en vain, cherché la cause.

613. *Portes des foyers.* Entre l'extrémité de la grille et la porte du foyer, on doit laisser un intervalle de 30 à 50 centimètres, suivant la grandeur du foyer; quand la distance est trop petite, les portes rougissent, ce qui occasionne une perte de chaleur, et elles se déforment et se brûlent quand elles sont en tôle. Cet espace est ordinairement occupé par une plaque de fonte engagée dans la maçonnerie, ou soutenue par des barres de fer. L'embrasure de la porte doit nécessairement aboutir aux deux extrémités de la grille, afin que le chauffeur puisse facilement et d'un seul coup d'œil en embrasser toute l'étendue. Les portes doivent avoir les dimensions seulement nécessaires pour que le chargement de la grille se fasse avec facilité; on leur donne ordinairement 15 à 30 centimètres de hauteur, et une largeur qui dépend de celle de la grille. Maintenant on les construit toujours en fonte, et elles sont montées sur des plaques de même métal maintenues contre la face antérieure du fourneau par quatre tiges de fer bifurquées, et taraudées en avant, qui pénètrent à une profondeur de 2 ou 3 décimètres dans la maçonnerie. Les portes sont à un ou deux battants, suivant leur grandeur; dans ce dernier cas, elles ne sont jamais dormantes, elles se maintiennent ouvertes ou fermées par le frottement des gonds, et elles

sont garnies chacune d'un crochet au moyen duquel le chauffeur les fait mouvoir. Quand les chaudières sont à bouilleurs, les plaques de fonte sur lesquelles les portes sont fixées servent en même temps à supporter les têtes des bouilleurs.

614. Quand les chaudières sont à basse pression et sans bouilleurs, comme il y a en avant de la chaudière un canal à fumée, il y aurait une trop grande distance de la porte à la grille si on mettait la porte dans le plan de la face du fourneau; alors, pour la rapprocher, on soutient en avant une partie de la maçonnerie par une voûte (fig. 8, 14, 15, 18, pl. 8), ou par une plaque de fonte (fig. 1 et 2, pl. 9), ou en la disposant en retrait (fig. 3, pl. 9), ou enfin on place la porte du foyer dans une embrasure en fonte (fig. 12, pl. 8). La première disposition est préférable aux autres; c'est aussi celle qui est le plus généralement employée.

Les figures 9....16 (pl. 9) représentent les détails de construction de plusieurs portes de foyer.

615. Dans quelques ateliers, j'ai vu employer de simples plaques de tôle de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, percées au centre d'une ouverture circulaire, et posées librement dans l'embrasure de la porte; on les enlève et on les place à l'aide d'une tige de fer qu'on introduit dans l'ouverture. Ce mode de fermeture, qui est à la vérité peu dispendieux d'établissement et d'un service facile, est le plus mauvais que je connaisse. Les plaques ne ferment jamais bien, elles laissent pénétrer beaucoup d'air froid et par les bords et par l'orifice, qui reste toujours ouvert; elles sont presque toujours incandescentes, et par conséquent laissent perdre une grande quantité de chaleur. Ainsi, l'économie apparente de leur construction et de leur service est bien compensée et au delà par les pertes de chaleur qu'elles occasionnent.

Quelquefois on fixe derrière la porte, et parallèlement, à une distance de quelques centimètres, une plaque de fonte maintenue par quatre boulons. Cette disposition empêche la plaque extérieure de rougir, et diminue beaucoup sa température.

Quelquefois aussi les portes sont garnies intérieurement d'un cadre rempli de terre à briques. Cette disposition est très-bonne pour diminuer la perte de chaleur; elle est surtout utile pour les grands foyers, parce qu'elle permet de diminuer la distance de la grille à la porte.

## § 2. — FOYERS A FLAMME RENVERSÉE.

616. Dans un grand nombre de fourneaux la flamme est plus ou moins inclinée, et même renversée au delà du foyer; mais cette circonstance, qui est indépendante de la direction de la flamme dans le foyer même, n'est pas celle dont il s'agit ici : nous voulons parler des foyers dans lesquels la flamme se développe à sa naissance dans une direction opposée à celle qu'elle prend naturellement (fig. 1 et 2, pl. 13).

617. La flamme s'élève verticalement par la légèreté spécifique que la chaleur donne aux gaz combustibles et à ceux qui sont produits par la combustion. Mais cette direction ne peut exister que dans un air calme, ou qui se meut dans le sens que la flamme tend à prendre naturellement. Quand le mouvement de l'air a une direction différente, les gaz combustibles prennent une direction qui est la résultante de leur force ascensionnelle et de la vitesse de l'air; et lorsque la vitesse du courant d'air est très-grande relativement à celle des gaz qui se dégagent, la flamme suit sensiblement la direction de ce courant.

Il résulte de là que si le courant d'air s'introduisait par la partie supérieure du foyer, la flamme se propagerait verticalement du haut en bas.

618. Les foyers à flamme renversée ont l'avantage de brûler plus complétement la fumée que les autres foyers, parce que les gaz combustibles, qui tendent naturellement à s'élever à cause de leur densité plus petite que celle de l'air, vont en quelque sorte à la rencontre du courant d'air; par la même raison, les flammes sont beaucoup plus courtes. Mais ces foyers ne peuvent être employés pour la houille (622) : les grilles se trouveraient sur la surface incandescente du combustible, et seraient bientôt détruites; cet inconvénient n'existe pas dans les foyers ordinaires, parce que les grilles sont continuellement refroidies par l'air qui vient alimenter la combustion, et, d'ailleurs, la combustion n'est bien active qu'à une certaine distance au-dessus de la grille.

619. M. Nivelle avait proposé, pour les chaudières à vapeur, de brûler la houille à flamme renversée sur des grilles creuses constamment remplies d'eau, et communiquant avec la chaudière. Les barreaux formeraient ainsi un grand nombre de petits bouilleurs qui ne pourraient

pas s'échauffer à une température suffisante pour que le métal fût altéré; mais cette disposition est trop compliquée, elle exigerait de trop fréquentes réparations, et ne présenterait pas des avantages assez importants pour compenser ces inconvénients.

Nous reviendrons sur les foyers à flamme renversée en parlant des foyers fumivores.

### § 3. — DES FOYERS INTÉRIEURS.

620. Nous n'avons parlé jusqu'ici que des foyers extérieurs aux chaudières, mais on brûle souvent le combustible dans l'intérieur même des chaudières; cette disposition est indispensable pour les générateurs des locomotives, et elle est très-commode et presque uniquement employée pour les générateurs des bateaux à vapeur. On avait pensé à l'origine que cette disposition des foyers devait présenter un très-grand avantage, parce que toute la chaleur rayonnante est absorbée; plus tard, on crut qu'une température élevée était indispensable à une bonne combustion, et alors les foyers intérieurs dans lesquels l'absorption de la chaleur rayonnante abaisse la température du combustible au-dessous de celle des autres foyers, parurent devoir favoriser la production de la fumée et furent regardés comme moins avantageux que les foyers extérieurs; de mauvais résultats obtenus dans des générateurs à foyers intérieurs mal construits, dans lesquels surtout les carneaux avaient une trop grande section et les surfaces de chauffe un trop petit développement, confirmèrent cette induction. Mais des expériences récentes, que nous rapporterons bientôt, ont fait voir que les foyers intérieurs peuvent être plus avantageux que les foyers extérieurs; nous reviendrons sur cet objet en parlant de la disposition générale des générateurs.

### § 4. — FOYERS FUMIVORES.

621. Lorsqu'on brûle des houilles grasses, du bois ou de la tourbe, dans les différents foyers que nous venons de décrire, il se dégage beaucoup de fumée, des gaz combustibles non brûlés, et de l'oxygène libre. La présence des gaz combustibles et de l'oxygène libre provient de ce que les veines de ces gaz se propagent parallèlement avec des vitesses

peu différentes. Mais le plus souvent la quantité d'oxygène libre est très-petite, et celle des gaz combustibles est très-grande : aussi aperçoit-on souvent des flammes à l'extrémité de certaines cheminées, et principalement de celles des chaudières de bateaux. La perte de chaleur dans la plupart des foyers à houille est assez considérable pour que l'on trouve de l'avantage, à Paris, à alimenter les foyers des chaudières à vapeur avec du coke, malgré son prix élevé.

On s'est beaucoup occupé de foyers fumivores, non-seulement pour éviter les inconvénients de la fumée, mais aussi dans l'espoir d'obtenir une grande économie de combustible. Les appareils qui ont été proposés sont très-nombreux; nous les décrirons successivement, en indiquant les effets qu'ils ont produits.

622. *Foyers à flamme renversée.* Ces foyers, imaginés par Dalesne, donnent de très-bons résultats; mais ils ne sont employés que pour le bois et la tourbe, parce que des grilles seraient nécessaires à la combustion des autres combustibles, et qu'elles seraient trop promptement détruites. On pourrait cependant brûler tous les combustibles sur grille à flamme renversée, en employant des barreaux en terre réfractaire. Cette disposition a été adoptée pour le bois, et elle a parfaitement réussi. Elle serait très-convenable pour la tourbe; mais pour la houille et le coke, les résidus se vitrifieraient sur les barreaux et les mettraient promptement hors de service.

623. Les figures 4 et 5 (pl. 9) représentent une coupe et une projection d'un foyer à bois, à flamme renversée. L'espèce de trémie dans laquelle le bois est engagé doit être garnie de plaques de tôle ou de fonte. Le bois descend par son propre poids ou par la pression que le chauffeur lui fait éprouver avec ses pieds; il doit être coupé d'une longueur égale à la largeur de la trémie dont la section est égale à celle d'une grille destinée à brûler la même quantité de bois dans le même temps. Ces foyers marchent très-bien sans donner de fumée, et sans produire d'accumulation de cendres dans le foyer proprement dit; toutes celles qui se produisent sont entraînées dans les carneaux; la combustion est si complète que les carneaux sont à peine noircis. Cette disposition est la meilleure qu'on puisse employer pour les foyers à bois. J'ai eu l'occasion de voir plusieurs chaudières à vapeur dont les foyers étaient ainsi disposés, et qui donnaient des résultats très-satisfaisants.

Quoique les foyers pour bois à flamme renversée ne produisent point de suie (du moins tous ceux que j'ai eu l'occasion d'observer sont dans ce cas), il est prudent cependant de se ménager les moyens de nettoyer au besoin les carneaux; et pour cela on doit creuser dans le sol et au delà des chaudières, un espace dans lequel s'ouvrent les portes des carneaux, et par lesquelles on puisse les nettoyer au moyen d'un ringard dont le manche s'allonge par des pièces qui se montent à vis.

624. Cette même méthode pourrait être employée pour brûler la tourbe; mais comme ce combustible produit beaucoup de cendres, il faudrait disposer l'appareil comme il est indiqué dans la figure 6 (pl. 9). En avant de la trémie se trouve un espace recouvert d'un grillage, et dans lequel le chauffeur peut descendre pour dégorger la grille en soulevant successivement les barreaux au moyen d'un ringard. Il serait possible qu'il fût avantageux de laisser passer continuellement un faible courant d'air à travers la grille. Je dois dire cependant que les foyers à flamme renversée appliqués à la tourbe n'ont point encore été essayés, et qu'alors on ne peut rien affirmer de positif sur leur efficacité, quoiqu'il soit bien probable qu'ils réussiraient comme pour le bois.

625. Ces mêmes foyers peuvent être employés pour la tannée en mottes. Mais pour la tannée en poudre, il faudrait se servir de la même disposition que pour la houille; seulement, les grilles devraient avoir une grande surface, les barreaux devraient être très-étroits et très-peu écartés les uns des autres.

626. Dans les foyers à poteries communes on brûle la houille dans des caisses latérales en maçonnerie, fermées de tous côtés, excepté endessus, où elles sont garnies d'une porte destinée à introduire le combustible et l'air nécessaire à la combustion; la face adossée au fourneau est percée de plusieurs orifices, par lesquels la flamme pénètre dans le fourneau. Ces foyers produisent peu de fumée; ils seraient cependant remplacés avec avantage par celui qui est indiqué dans la figure 4 (pl. 13). La combustion est alimentée et par l'air qui passe à travers la grille AB, et par celui qui pénètre à travers l'orifice C, qui sert à introduire le combustible, et dont on peut régler à volonté l'ouverture.

627. On a aussi imaginé de renverser la flamme au delà du foyer, en la faisant passer sous une voûte (fig. 4, pl. 12). Dans des expérien-

ces récentes, faites par MM. Thomas et Laurens, sur un foyer disposé ainsi, avec un peu de soin, on évitait complétement la fumée, et on obtenait une économie de combustible de un dixième; mais la voûte était détruite en 3 ou 4 mois.

628. *Foyers à reverbère.* Dans cette disposition, le foyer est surmonté d'une voûte en briques réfractaires, et l'air chaud s'échappe tantôt par des orifices diversement placés dans la voûte, tantôt à la suite quand elle est cylindrique. La figure 1 (pl. 10) représente ce dernier arrangement. Par cette disposition, le foyer se trouve à une très-haute température, et si le combustible est facilement décomposable, comme le bois, la tourbe et les houilles grasses, il se dégage beaucoup plus de fumée que dans les foyers ordinaires; ainsi, ces prétendus foyers fumivores produisent un effet opposé à celui qu'ils promettent. En outre, ils ont le grand inconvénient de diminuer ou de rendre presque nul l'échauffement de la chaudière par rayonnement, et par conséquent d'exiger des surfaces de chauffe beaucoup plus étendues. Cette disposition pourrait cependant être très-utile pour certains anthracites qui ne brûlent bien qu'à une haute température.

629. *Foyers avec introduction d'air froid ou chaud sur la flamme.* Les foyers fumivores à courants d'air froid paraissent avoir été employés pour la première fois par Watt. Mais ce fut Robertson qui prit le premier, en 1801, une patente en Angleterre, pour la construction de ces foyers. Son appareil consistait en une grille un peu inclinée vers le fond du foyer; l'air extérieur arrivait à travers la grille comme dans les appareils ordinaires, mais le foyer était alimenté de combustible par une trémie placée au-dessus de la porte, et au-dessus de la trémie se trouvait une fente étroite par laquelle entrait un courant d'air qui arrivait directement sur la flamme. Ces dispositions ne présentent pas à beaucoup près les avantages qu'on s'en était promis; aussi sont-elles abandonnées. La figure 2 (pl. 10) représente un appareil analogue à celui de Robertson, mais qui est beaucoup plus simple; on étale le combustible sur la grille au moyen d'un ringard, on fait tomber le résidu au moyen d'une coulisse qui se trouve au delà de la grille, et on peut surveiller la combustion par la fente qui laisse arriver de l'air sur la flamme.

630. Les appareils dans lesquels le foyer est alimenté par une trémie

supérieure ou placée au niveau de la grille, ont l'avantage de ne pas produire autant de fumée que les appareils ordinaires, parce que dans ces derniers, la cause la plus efficace de dégagement de fumée est l'ouverture de la porte lors du chargement du foyer; mais il est difficile de gouverner la grille et d'y maintenir constamment le combustible à une hauteur convenable. En outre, l'introduction de l'air froid peut produire un effet contraire à celui qu'on en attend, si cet air est en quantité trop grande; ces appareils ne seraient d'ailleurs pas applicables à de grandes grilles.

631. Depuis, on a imaginé d'introduire de l'air chaud dans la flamme, par une fente longue et étroite disposée comme dans les figures 7 et 8 (pl. 9). Tantôt l'air s'échauffait en passant dans deux carneaux placés de chaque côté du foyer dans lequel il pénétrait par deux ouvertures placées de chaque côté de la porte; d'autres fois il prenait une température plus ou moins élevée en traversant des grilles creuses; d'autres fois, enfin, il était échauffé par son passage dans des tuyaux placés dans les carneaux, et même dans la cheminée; mais tous ces appareils sont peu efficaces et n'ont point été adoptés par l'industrie.

632. Les figures 3 et 4 (pl. 10) représentent une disposition analogue à celle que nous venons de décrire, mais qui, par certaines modifications, pourrait produire de très-bons effets. Le foyer est disposé à la méthode ordinaire, mais au delà, se trouvent des cônes de fonte creux, qui reçoivent de l'air extérieur par un canal M, et le rejettent autour d'eux par un grand nombre de petits orifices percés dans leurs surfaces. Ces cônes étant placés dans le courant d'air brûlé, prennent une température très-élevée, qu'ils communiquent à l'air qui les traverse. Si on plaçait la grille beaucoup plus bas, et si on la couvrait d'une couche très-épaisse de combustible, de manière qu'il ne sortît du foyer que de l'oxyde de carbone et des carbures d'hydrogène, et si en même temps l'air extérieur était foulé dans les cônes par une machine soufflante, de manière que les jets d'air se prolongeassent à une certaine distance des cônes, les remous qu'ils occasionneraient pourraient produire une combustion complète de la fumée, et un accroissement notable d'effet utile, pourvu que la vitesse de l'air et la somme des sections des orifices soient convenables. Mais la vitesse de l'air serait difficile à déterminer, et on pourrait craindre des détonations.

633. *Foyers doubles, dont l'un est alimenté par du coke, et sur lequel passe la flamme du premier.* Cette disposition, imaginée par Watt, est très-efficace quand les portes sont fermées, mais elle l'est très-peu quand elles sont ouvertes, parce qu'il n'y a qu'une petite quantité d'air qui traverse le coke; d'ailleurs, elle exige deux combustibles. On pourrait facilement disposer les appareils de manière à alimenter les deux foyers avec de la houille, et à obtenir cependant le même effet que si l'un d'eux était constamment alimenté avec du coke; il suffit, pour cela, de charger alternativement les deux foyers, et de faire passer la fumée du foyer qu'on charge sur l'autre; car, pendant la seconde moitié de la combustion de la houille, ce combustible est à peu près à l'état de coke. L'appareil pourrait être disposé comme l'indique la figure 5 (pl. 10); la fumée du foyer qu'on vient de charger serait obligée de passer sur l'autre au moyen de deux registres en fonte épaisse qu'on élèverait et qu'on abaisserait successivement. On pourrait aussi employer la disposition figure 6 (pl. 10). La grille est circulaire et mobile de manière à tourner successivement en sens contraire d'un demi-tour. On amènerait toujours du même côté, le plus éloigné de l'ouverture du carneau, la partie de la grille qu'on chargerait de houille. Tous ces appareils ont l'inconvénient de diminuer l'étendue de la surface de la chaudière qui reçoit le rayonnement du foyer, et par conséquent d'exiger une plus grande surface de chauffe.

634. MM. Chanter et compagnie ont eu l'idée d'incliner la grille, de manière à produire naturellement l'écoulement du coke à l'arrière de la grille figure 1 (pl. 14); mais il faut que la chaudière ait la même inclinaison. Ils ont réussi ainsi à brûler complétement la fumée des foyers des machines locomotives, dans lesquels on brûlait $\frac{3}{4}$ de houille et $\frac{1}{4}$ de coke. Nous transcrivons l'article du journal le Technologiste relatif à ces nouvelles dispositions :

« La condition imposée sur les chemins de fer, savoir, que les machines à vapeur travaillent sans répandre de fumée, a contraint jusqu'ici les ingénieurs à ne faire usage que du coke; aucun des moyens trouvés jusqu'ici pour brûler la fumée de la houille n'étant suffisamment efficace. Le haut prix du coke en Angleterre, où l'on n'a pas trouvé le moyen d'utiliser la chaleur perdue des fours à coke, a donné naissance à un nombre infini de combinaisons pour essayer d'employer la houille dans

les locomotives, en brûlant complétement la fumée. MM. Chanter et compagnie, ingénieurs anglais, paraissent être parvenus, déjà depuis quelques années, à brûler presque complétement la fumée dans les machines fixes, et un certain nombre de fourneaux sont en activité dans diverses parties de l'Angleterre, où ils paraissent fonctionner à la satisfaction des propriétaires d'usines; mais cette méthode, qui a eu quelques succès pour les machines stationnaires, était considérée par les ingénieurs et les inventeurs eux-mêmes, dans son état primitif, comme complétement inapplicable aux foyers des locomotives.

« Les principales dispositions de l'appareil de MM. Chanter consistent : 1° à placer les barreaux de la grille dans une direction inclinée; 2° à donner à la chaudière à peu près la même inclinaison, et à donner à la grille une inclinaison suffisante pour que le combustible puisse glisser le long des barreaux à mesure qu'il se consume, de manière que la partie inférieure soit toujours occupée par du coke, et la partie supérieure par du charbon neuf. La figure 5 (pl. 14) représente la coupe d'un foyer de MM. Chanter appliqué à une locomotive. A est le foyer. B,B,B, trois grilles placées sous des inclinaisons différentes. C, partie de la chaudière qui descend jusque dans le combustible incandescent. D, porte pour l'introduction de la houille. E, porte pour l'introduction du coke par le tube F. Des expériences multipliées, faites en 1839 sur différentes locomotives, ont démontré qu'en employant $\frac{3}{4}$ de houille et $\frac{1}{4}$ de coke, la fumée était complétement brûlée. »

635. La fumée provenant principalement du mode de chargement généralement employé, on a pensé de bonne heure que si l'on parvenait à verser d'une manière continue le combustible sur la grille, on parviendrait à rendre les foyers fumivores. On a imaginé, pour cela, un grand nombre d'appareils différents, dont nous nous contenterons de donner les principaux types.

636. *Foyers à distributeur et à grille tournante.* Dans ces appareils, le combustible est versé sur la grille par une trémie placée au-dessus et à des intervalles très-rapprochés; la grille est circulaire et animée d'un mouvement de rotation très-lent.

La figure 7 (pl. 10) présente une élévation et une coupe transversale; la figure 8 une coupe longitudinale d'une chaudière à basse pres-

sion destinée à une machine de 20 chevaux, de la construction de William Bruton.

AA, chaudières de Watt. BB, appendices à ces chaudières, disposés au-dessus des grilles tournantes; la fumée passe au-dessus et au-dessous des autels *dd*, de là au-dessous des chaudières, et tourne autour dans des carneaux qui peuvent se nettoyer par les portes DD. EE, trémies dans lesquelles on met le charbon brisé en morceaux d'une grosseur convenable; de là il tombe sur la grille par les ouvertures F; la chute est déterminée par un mouvement de va-et-vient imprimé à la plaque qui termine la trémie, et la quantité de combustible versé dans un temps donné sur la grille, dépend de l'orifice F que l'on règle à la main et qu'on peut faire régler par l'appareil de niveau. H, porte qui sert à surveiller la grille. K, axe de la grille qui est mis en mouvement par une roue fixée à cet axe et un pignon placé sur l'arbre N. *h*, briques réfractaires qui environnent la grille; pour que l'air ne passe pas autour de la grille, elle est garnie d'un cercle mince qui se prolonge au-dessous et se meut dans une auge circulaire garnie de sable fin. Dans ces appareils, une grille de $1^{m}50$ de diamètre brûle de 120 à 150 kilog. de houille à l'heure, ce qui correspond de 7 à 8 kilogr. par 10 décimètres carrés. La grille fait une révolution complète en trois ou quatre minutes; l'injection du combustible a lieu toutes les demi-minutes.

Ces appareils brûlent assez complétement la fumée; mais ils sont compliqués; ils exigent trop de surveillance et de trop fréquentes réparations; aussi sont-ils peu employés.

Un appareil de ce genre a été importé en France il y a vingt ans, et établi aux bains du quai de Gèvres, où il a continué jusqu'à ce jour à fonctionner.

637. *Foyers à grilles fixes alimentées d'une manière continue par un ventilateur.* Les appareils analogues à celui que nous venons de décrire n'eurent pas un grand succès, ou du moins ne furent pas généralement admis par l'industrie, à cause de leur complication et de la faible économie de combustible qu'ils présentaient; d'ailleurs, ils exigeaient des chaudières disposées d'une manière particulière. En 1822, on avait déjà beaucoup amélioré ces appareils, en rendant l'alimentation continue, les grilles fixes, et en disposant les appareils de manière à les appliquer à tous les fourneaux sans aucune modification dans les chaudières. A la fin

de cette même année, M. Collier prit, en France, un brevet d'importation pour un distributeur mécanique ainsi modifié; mais il eut bientôt reconnu que, dans la pratique, l'appareil laissait beaucoup à désirer, et dès lors il se livra à des essais en grand pour le rendre meilleur; et en 1823 il prit trois brevets de perfectionnements pour ces appareils. Depuis, M. Collier a vainement essayé de faire adopter son appareil dans plusieurs établissements; ses efforts ont constamment échoué contre le mauvais vouloir ou la coalition tacite des chauffeurs, qui voyaient que, si l'appareil réussissait, leurs intérêts seraient gravement compromis. Mais les avantages du nouveau distributeur ont été mieux appréciés en Angleterre, et depuis peu de temps deux de ces appareils ont été importés.

Nous décrirons un appareil de M. Collier établi dans ses ateliers pour une machine à haute pression de la force de 6 chevaux.

Tout le mécanisme est appliqué verticalement à la face antérieure du fourneau. Il se compose principalement d'une trémie à débit continu, de deux cylindres broyeurs, horizontaux, à pointes de diamant, et de deux projecteurs circulaires, contigus, placés dans le même plan horizontal, qui tournent en sens inverse et concourent au même effet. La houille, à mesure qu'elle descend par la trémie, est réduite partie en petits éclats, partie en poussier par les broyeurs; ainsi préparée, elle tombe sur les projecteurs, dans l'espace qui est compris entre leurs deux axes, et elle est continuellement lancée par eux sur la chauffe incandescente. La forme des projecteurs est celle d'une roue composée d'une coquille conique droite et de six palettes trapézoïdales, verticales, implantées autour de la coquille. Leur vitesse est de près de 200 tours à la minute, et l'on conçoit qu'un léger effet de ventilation doit se joindre à leur effet principal. Le débit du combustible est facile à régler à l'aide d'une vis de rappel. Tout le système est en fer et se trouve établi sur une grande et forte plaque du même métal, verticale et percée convenablement du côté du fourneau. Cette plaque étant placée sur des roulettes, l'appareil peut alternativement servir deux chaudières.

D'après M. Cordier, à qui nous avons emprunté les détails qui précèdent (Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, 1837), l'appareil dont nous venons de donner une description sommaire fonctionnait depuis six mois. Voici les avantages qu'il y trouve :

1° Le chauffage est parfaitement régulier; 2° toutes les parties du combustible, ou presque toutes, sont brûlées sous les bouilleurs ou sous la chaudière; 3° la fumée qui se dégage au sommet de la cheminée n'excède pas la quantité qui est produite par beaucoup de foyers domestiques alimentés par le bois; elle est d'ailleurs d'une teinte roussâtre très-claire, et elle n'offre aucun des inconvénients qui rendent si incommode le voisinage des grands ateliers chauffés à la houille; 4° on consomme à peu près $\frac{1}{10}$ de combustible de moins que par les procédés de chauffage ordinaires; 5° on emploie sans difficulté la houille menue; 6° le tisage s'exécute facilement sans qu'on ouvre le fourneau : à cet effet, on se contente, à l'aide d'un ringard à crochet promené sous la grille, de piquer de temps à autre la couche de combustible en ignition, de manière à ce qu'elle ne conserve jamais plus de 3 centimètres d'épaisseur; 7° le chauffeur se trouvant chargé d'une surveillance extrêmement facile, peut donner plus de soin à la machine; il a besoin d'ailleurs d'une moindre habileté que les chauffeurs ordinaires. Enfin, l'appareil peut être appliqué à toute espèce de fourneau; il peut ensuite en être séparé sans perdre de sa valeur, et rentrer dans la circulation commerciale.

Le travail dépensé par la machine a été évalué à $\frac{1}{2}$ cheval, c'est-à-dire, à $\frac{1}{12}$ de la force totale. Le prix de l'appareil est d'environ 1000 francs.

638. La planche 11 représente le distributeur fumivore de M. Collier.

A, trémie qui contient la houille.

B,B', cylindres broyeurs. Le cylindre B reçoit son mouvement de la machine à vapeur, à l'aide des moyens de communication suivants :

*a*,*a'*, tambours sur lesquels passent des courroies qui leur transmettent le mouvement de la machine à vapeur. On se sert de l'un ou l'autre des tambours *a*,*a'*, suivant que l'appareil est placé devant l'une ou l'autre des deux chaudières. On fait passer la courroie sur l'une des trois portions cylindriques qui forment chaque tambour, selon la vitesse qu'on veut obtenir.

*b*,*b'*, roues réunies avec chacune des roues *c*, *c'* par une corde sans fin.

*c*,*c'*, roues fixées sur les axes *d*, *d'*.

*d*,*d'*, arbres verticaux sur lesquels sont montés les projecteurs C,C'. L'arbre *d'* porte une vis sans fin qui transmet le mouvement de rotation à la roue *e*. Cette roue est montée sur un axe qui porte une seconde vis sans fin qui fait tourner la roue *f* fixée à l'axe du cylindre B.

*g*,*g'*, roues d'engrenage qui ont pour but de communiquer à la roue *h*, montée sur l'axe du cylindre B', un mouvement en sens contraire de celui du cylindre B. L'axe du cylindre B' peut être à volonté rapproché ou éloigné de celui du cylindre B, au moyen du mécanisme suivant.

*i*, point fixe autour duquel peut tourner le bras de levier *h* qui porte l'axe du cylindre B'.

*l*, vis qui sert à mouvoir le bras de levier K.

*m*,*m*, vis qui servent à faire mouvoir les tourillons de l'axe sur lequel est montée la roue *e*, de manière que les divers engrenages aient lieu exactement.

C,C, projecteurs dont on voit le détail sur la figure 5.

*o*, regard pratiqué dans la boîte où sont contenus les projecteurs.

*nn*, porte qui forme la paroi antérieure de cette boîte.

D, plaque verticale en fonte, sur laquelle est fixé l'appareil, et qui est portée sur des roulettes.

*p*, manivelle qui sert, à l'aide d'une roue d'engrenage et d'une crémaillère fixe, à faire mouvoir tout l'appareil.

Une addition importante et ingénieuse a été faite au distributeur fumivore de M. Collier; le tisage du charbon, dont il a été fait mention ci-dessus, a été remplacé par un mouvement oscillatoire de chacun des barreaux qui composent la grille. Les mâchefers qui se forment dans le foyer sont brisés par ce moyen, et s'échappent à chaque instant.

La figure 8 fait voir les détails relatifs à ce perfectionnement.

E, barreaux de fonte; chacune de leurs extrémités *q* est arrondie à la partie inférieure, afin de permettre aux barreaux de prendre un mouvement d'oscillation. Chaque barreau porte un appendice *r* terminé par un goujon.

F, banc de fonte percé de trous qui reçoivent les goujons des appendices *r*.

G, arbre horizontal formé de deux parties réunies par un manchon *s*, que l'on fait glisser sur la douille carrée que porte l'arbre, lorsqu'on veut changer de place le distributeur. L'axe G porte un goujon qui entre dans un anneau fixé à la barre F, auquel il communique le mouvement de va-et-vient qu'il reçoit lui-même de la bielle.

H, bielle verticale portant à sa partie inférieure un œil dans lequel passe un goujon *u* fixé à l'arbre G.

K, excentrique fixé à l'axe du cylindre fixe B, et qui communique un mouvement d'oscillation à la bielle.

L, tubes bouilleurs.

M, chaudière à vapeur.

639. On trouve dans le journal le Technologiste (décembre 1839) la description d'un appareil analogue construit par Oldham. La grille est animée d'un mouvement oscillatoire, mais l'alimentation n'a pas lieu d'une manière continue; le combustible fourni par la trémie tombe sur une plaque horizontale qui, à certaines époques, se relève brusquement et verse sur le foyer le combustible dont elle est chargée.

640. Malgré tous ses avantages, l'appareil de M. Collier est encore trop compliqué, et il est peu probable qu'il soit adopté par l'industrie, d'autant plus que la disposition suivante, qui produit exactement le même effet, est bien préférable, parce que l'injecteur est entièrement supprimé.

641. *Foyer à grille fixe et à distributeur direct.* Les figures 1, 2, 3 (pl. 12) représentent l'élévation et deux coupes verticales d'un distributeur établi dans l'ancienne fabrique de produits chimiques de M. Payen, à Grenelle, et qui fonctionne avec une grande régularité depuis plusieurs années, sans laisser dégager de fumée.

Figure 1re, élévation du fourneau et du distributeur; figure 3, coupe verticale suivant la ligne AB; figure 2, coupe verticale suivant la ligne CD.

A, foyer. B, grille fixe. C, cendrier. D,D, bouilleurs. E,E, obturateurs des bouilleurs, assujettis par des croisillons fixés par des vis et des écrous. F, porte du foyer. G, chaudière. H,H, axes quadrangulaires portant sur leur longueur quatre cylindres dont les dents à rochet *a*,*a*,*a*, sont alternées, de sorte que la saillie d'une cannelure correspond aux creux de la cannelure du cylindre suivant. K, trémie à trois compartiments K′,K′,K′, qui reçoit de la houille menue. L,L, murs de soutenement de la plate-forme de la trémie. M,M,M, trois loquets régulateurs glissant le long des plans inclinés qui forment les compartiments de la trémie; ils sont destinés à augmenter à volonté l'espace ménagé pour le passage du combustible; on les fixe à l'aide des écrous *b*,*b*. O,O, roues dentées sur

les axes des cylindres cannelés H,H, et mues par la vis sans fin P, fixée à l'arbre de couche Q. R, roue dentée recevant, de la machine à vapeur, à l'aide d'une vis sans fin S, fixée à l'arbre N, et des poulies T′T′T′, le mouvement qu'elle transmet ensuite à l'arbre Q, et par suite aux cylindres cannelés H,H.

Dans cet appareil, deux moyens ont été ménagés pour accélérer ou ralentir la chute du combustible : l'un consiste dans le resserrement ou l'élargissement du passage, à l'aide des taquets à coulisse M,M,M; l'autre dépend des trois poulies T′T′T′ qui, ayant des diamètres différents, impriment des vitesses différentes aux cylindres dentés H,H.

Dans l'appareil établi dans l'ancienne usine de M. Payen, les cylindres dentés font moyennement 45 tours à la minute, et versent 15 kilog. de houille à l'heure sur le foyer. La machine est de Hall; elle est estimée de la force de 6 chevaux, ce qui ferait $2^k \frac{1}{2}$ de houille par cheval et par heure.

Ce système de distribution, exempt de mécanisme agissant dans le feu, d'une construction simple, solide et ingénieuse, et qui ne laisse dégager aucune fumée appréciable, est beaucoup supérieur aux autres sous tous les rapports.

642. *Foyers fumivores par des remous produits dans la fumée.* L'analyse de la fumée ayant démontré qu'elle renfermait de l'oxygène libre, et presque toujours assez pour brûler toutes les matières combustibles qui s'y trouvent, on imagina d'abord de faire descendre la fumée au-dessous d'une voûte placée au delà du foyer (fig. 4, pl. 12); les veines parallèles d'air et de gaz combustibles étant à des températures différentes, devaient éprouver des retards inégaux, et par suite se mêler. Cette disposition permet de brûler la fumée, mais ne produit réellement que peu d'effet utile (627), car elle a le grand inconvénient de diminuer le rayonnement du foyer sur la chaudière, et par conséquent d'exiger de plus grandes surfaces de chauffe.

643. Il y a quelques années, M. Lefroy a imaginé une nouvelle disposition de foyers qui les rend parfaitement fumivores, et qui a été établie dans un grand nombre d'usines. L'appareil de M. Lefroy se compose d'un petit corps de bâtisse placé en avant du fourneau qui renferme la grille, et d'un appareil placé au-dessus qui permet de jeter sur la grille un volume déterminé de combustible à des intervalles aussi déterminés, sans

établir de communication entre l'intérieur et l'extérieur; au delà de la grille se trouvent quatre ouvertures longues, étroites, percées dans les faces latérales du foyer, dans la voûte et dans la maçonnerie qui se trouve au delà de la grille; elles sont ordinairement fermées, mais elles s'ouvrent simultanément par un mécanisme très-simple après chaque chargement. Les remous et les tourbillonnements qu'éprouve la fumée par ces courants d'air qui arrivent de différents côtés et dans un espace à une très-haute température, produisent une combustion complète de la fumée.

Les figures 5 à 15 (pl. 12) représentent différentes élévations et coupes d'un de ces appareils.

Figure 5, coupe du foyer suivant la ligne 1,1 (fig. 8). Figure 6, plan du foyer au niveau du sol. Figure 7, coupe horizontale à la hauteur de la ligne 3,3 (fig. 5). Figure 8, coupe horizontale à la hauteur de la ligne 4,4 (fig. 5). Figure 9, plan de la partie supérieure du foyer. Figure 10, coupe verticale du foyer suivant la ligne 6,6 (fig. 7). Figure 11, élévation de la face de devant du foyer, ou projection verticale sur le plan 7,7 (fig. 6). Figure 12, élévation latérale, ou projection sur le plan 88 (fig. 9).

A, ouverture du cendrier. B, cendrier. C, intérieur du foyer. D, ouverture pour nettoyer la grille du foyer; cette ouverture est fermée par une porte E (fig. 11) à coulisse; elle est formée d'un cadre en fonte, garni de briques réfractaires; aux deux tiers de sa hauteur elle est percée d'un trou F, qui sert à introduire une tige pour remuer la houille en combustion; ce trou est ordinairement fermé par un tampon d'argile; cette porte est fixée à une chaîne G, qui s'enroule sur deux poulies, et dont l'extrémité porte un contre-poids K. I,I, coulisses dans lesquelles glisse la porte. *a* (fig. 5, 9 et 10), passage de la flamme. *bb* (fig. 5, 10), grille de fonte supportée par deux traverses *cc*. *ss* (fig. 7), ouvertures pour l'introduction de deux traverses de fer servant à supporter la grille. *dd* (fig. 5, 10), ouverture par laquelle le combustible tombe sur la grille.

L'appareil à l'aide duquel on charge le foyer sans le mettre en communication avec l'air extérieur, se compose des pièces suivantes : 1° d'un châssis *ef* de fer forgé ou de fonte, divisé en deux compartiments *gh* : le premier *g*, rempli dans son intérieur par des briques ou un grand carreau de terre à gazette; le second *h*, recouvert par une plaque de tôle évidée dans son milieu pour recevoir un cylindre de forte tôle *i* (fig. 10,

11, 12), fermé dans sa partie supérieure par un couvercle *k*, et dans sa partie inférieure par un registre à coulisse *n* (fig. 14), également en tôle, et dont la tête est fixée par deux pattes *m*,*m* dans le fer de ceinture *oo* (fig. 12) qui couronne le foyer. Ce châssis est armé en outre d'une tige de fer *p* (fig. 9, 10, 11, 14), terminée par une poignée *q* (fig. 9). 2° D'une tringle de fer *rr* (fig. 9), terminée par des pattes fixées avec des vis dans le même fer de ceinture *oo*, et liée au châssis par deux conduits ou pitons à œil, et dont l'effet est de guider l'appareil dans son mouvement de translation. Entre les charges, le compartiment *h* du châssis sert de fermeture à la trémie, comme on le voit figure 9.

Quand on veut charger, on lève le couvercle *k*, on jette la houille dans le cylindre *i*, qui se trouve alors fermé dans sa partie inférieure par le registre, et on remet le couvercle en place. Cela fait, l'ouvrier saisit la poignée *q* et la pousse jusqu'à ce que la partie antérieure *e*, *e* (fig. 9) de l'appareil soit arrivée en *t*,*t*, où elle se trouve arrêtée par deux points fixes. Par suite de ce mouvement de translation, le second compartiment *h* se trouve occuper la place que le premier *g* occupait, c'est-à-dire que le cylindre repose sur la trémie *d* (fig. 10 et 12); mais comme le registre *nn* n'a pu participer à ce mouvement, puisqu'il est fixe, le cylindre s'est ouvert naturellement, et la houille qui n'était plus retenue est tombée sur la grille. La charge ainsi opérée, l'ouvrier ramène l'appareil dans sa position primitive, et le registre se referme de lui-même.

*a'*,*a'*,*a'* (fig. 5 et 9), ouvertures ménagées dans la partie supérieure et sur les flancs du foyer, et qui ont pour objet de diriger des jets d'air dans le foyer. *b*,*b*,*b* (fig. 5, 9, 12), registres de tôle forte, destinés soit à intercepter, par leur fermeture, le passage des lames d'air, soit à introduire, par leur plus ou moins grande ouverture, la quantité d'air nécessaire, quantité qui dépend de la grandeur de la charge, de la nature du combustible, du temps qui s'est écoulé depuis le premier instant de la charge, etc. La base de cette colonne d'air varie depuis 4 jusqu'à 30 pouces carrés.

L'appareil pour faire manœuvrer simultanément ces trois registres, manœuvre dans laquelle gît principalement l'action fumivore du foyer, se compose de deux équerres doubles (chacune de deux branches), la première *c'c'c'* (fig. 9 et 12) en fer plat, embrassant verticalement le foyer, et à laquelle les trois registres *b'*, *b'*, *b'* (fig. 5, 9 et 12) sont solide-

ment attachés par des vis à tête fraisée; la seconde équerre $d', d', d'$ (fig. 9 et 12), embrassant horizontalement le foyer, fixée à la première équerre en $e'e'$ par des clous à tête fraisée, à branches en fer rond, glissant dans les yeux des pitons $f'f'$ vissés dans des écrous scellés dans la maçonnerie, et portant dans son milieu une tige de fer $g'$ avec poignée, pour faire manœuvrer l'appareil; ledit assemblage d'équerres consolidé de chaque côté de l'appareil (fig. 12) par un double lien en fer $h', h'$, dont les extrémités à pattes sont fixées en $j'j'$ par des vis aussi à tête fraisée, pour pouvoir démonter l'appareil à volonté. $i, i$ (fig. 9), petite équerre double, graduée sur le côté des deux branches ou sur une seule, et à pattes scellées dans la maçonnerie ou fixées à vis dans un des fers de ceinture du fourneau : elle sert de guide au chauffeur, puisque donnant le degré d'ouverture des registres, elle lui fait connaître la grandeur de la base de la colonne d'air dirigée sur la flamme, et qui est de 1,26 pouce carré par ligne d'ouverture des registres.

644. Ces appareils ont eu à l'origine beaucoup de vogue; on en a construit dans un grand nombre d'ateliers; mais on y a complétement renoncé, d'abord parce que l'effet utile du combustible était diminué par suite de la trop grande quantité d'air introduite dans le foyer à chaque charge; ensuite parce que les chaudières étaient facilement brûlées dans le voisinage du foyer.

645. Il résulte de tout ce que nous venons de dire sur les foyers fumivores, que pour le bois et la tourbe on parvient à brûler complétement la fumée dans les foyers à flamme renversée, et que pour la houille on parvient au même résultat par plusieurs procédés différents, mais qui n'ont point été adoptés, ou parce qu'ils exigent trop de soins de la part du chauffeur, ou des appareils trop compliqués, ou parce qu'en appelant dans le foyer un trop grand excès d'air, ils font perdre, par l'abaissement de la température de l'air brûlé, l'avantage qui pourrait résulter de la combustion complète de la fumée. Les foyers à grilles fixes ou mobiles, mais alimentés d'une manière continue, ont tous d'ailleurs l'inconvénient de s'arrêter ou d'éprouver des accidents, quand il se trouve des pierres dans la houille, ce qui arrive fréquemment.

646. Au reste, il ne faut pas s'exagérer l'importance d'un appareil spécial pour brûler la fumée de la houille. Un foyer bien construit, dont la grille aurait une étendue suffisante, qui serait alimenté par un combus-

tible dont les fragments ne s'agglomèrent pas trop, et qui surtout serait dirigé par un chauffeur intelligent, donnerait en général peu de fumée, et un effet utile peu différent de celui qu'on pourrait obtenir d'un bon appareil fumivore.

### § 5. — FOYERS A INJECTIONS DE VAPEUR OU D'AIR.

647. *Injection de la vapeur.* L'introduction de la vapeur dans les foyers a été faite de deux manières différentes : on l'a fait arriver librement dans le cendrier au-dessous de la grille, ou d'abord dans des grilles creuses, d'où elle s'échappait par de petits orifices percés sur leurs faces latérales (fig. 7 et 8, pl. 13).

Dans la fabrique de M. Clin, à Reims, se trouvait en 1837 une machine de douze chevaux, à haute pression (3 ath. $\frac{1}{2}$), à détente et sans condensation, faisant marcher une filature ; la grille avait $0^m,66$ de largeur sur 1 mètre de longueur ; le cendrier était fermé par une plaque de tôle simplement posée contre l'orifice ; la vapeur arrivait sous la grille par un tuyau garni d'un robinet. La machine fonctionnait régulièrement tous les jours pendant treize heures; M. Clin m'assura que quand il travaillait sans vapeur il consommait 550 kilogr. de houille par jour, et quand il employait de la vapeur, la consommation ne s'élevait qu'à 350 ; que la machine ne travaillait qu'avec la force de dix chevaux, et qu'en été seulement il était obligé d'injecter de la vapeur dans la cheminée pour augmenter le tirage. D'après l'estimation de la force de la machine, un cheval ne consommerait par heure que $2^k,70$ de houille.

A la même époque, dans l'établissement de M. Pradine, où se trouvait une machine de douze chevaux, garnie d'un appareil à grille creuse de M. Dartois, on m'assura que sans vapeur on consommait 700 kilogr. de houille en quatorze heures, et seulement 550 kilog. quand on employait de la vapeur.

Depuis, les détenteurs de brevet pour l'injection de la vapeur sous la grille ont publié plusieurs résultats d'expériences faites dans différents lieux, d'où il semblait résulter de ce nouveau mode de combustion une économie de combustible qui s'élevait de 21 à 30 pour 100. Ces résultats paraissaient fort extraordinaires, car l'introduction de la vapeur pouvait faire produire de la flamme à des combustibles qui brûlent ordinaire-

ment sans flamme; mais comme la quantité de chaleur produite par la formation de l'eau est égale à celle qui est absorbée par sa décomposition, il ne pouvait pas y avoir accroissement de chaleur.

Aussi des expériences faites avec tout le soin convenable par une commission de l'Institut, et d'autres faites à la manufacture des tabacs de Paris, ont-elles nettement démontré que l'introduction de la vapeur n'a aucune influence sur la quantité de chaleur développée.

649. *Injection d'air sous la grille.* Depuis, on a imaginé de fermer les orifices du cendrier et d'injecter sous la grille un courant d'air froid. On a publié qu'on obtenait ainsi une très-grande économie de combustible. On avait même monté un grand atelier pour construire ces appareils, mais l'entreprise n'a pas réussi. On ne comprend pas en effet comment ces courants forcés auraient pu augmenter la puissance calorifique du combustible. Cependant cette disposition pourrait être utile pour les fourneaux mal construits, qui ont un trop faible tirage, provenant ou d'une trop grande étendue des surfaces de chauffe, ou d'une trop petite section des carneaux et de la cheminée; mais elle serait sans influence dans les fourneaux bien disposés, comme l'expérience le démontre.

650. *Injection de vapeur et d'air.* On a enfin imaginé d'introduire dans le cendrier, hermétiquement fermé en avant, un courant de vapeur par un tuyau placé au centre d'un tube s'ouvrant dans le cendrier et à l'extérieur. Le courant de vapeur produit un appel d'air et une pression dans le cendrier, lorsque le jet remplit tout le tuyau. Cette disposition est bonne quand les cheminées n'ont qu'un faible tirage ou quand on refroidit complétement la fumée, et peut remplacer le tirage par une machine. Dans certaines circonstances elle serait même plus commode qu'un ventilateur, mais elle n'est pas plus efficace pour augmenter l'effet utile.

## § 6. — FOYERS A HOUILLES SÈCHES ET A ANTHRACITES.

651. Les houilles sèches et les anthracites peuvent brûler sur grilles, mais dans des conditions particulières qui dépendent de la manière dont ces combustibles se comportent au feu. Pour tous, l'épaisseur de la couche de combustible doit être considérable, afin que le foyer soit à une haute température, et qu'il ne laisse échapper qu'un petit volume d'air sans altération.

652. Les houilles sèches de Fresnes, de Vieux-Condé et des environs de Valenciennes, sont voisines de l'anthracite, mais elles brûlent plus facilement. Cependant jusqu'ici on ne les a employées que pour la cuisson de la chaux, de la brique, et dans les poêles. Ces houilles brûlent cependant très-bien sur grilles, mais on ne savait pas les employer. Encore maintenant on fait venir à Fresnes des houilles grasses d'Anzin pour les chaudières des machines d'extraction.

C'est M. Évrard, ingénieur civil à Valenciennes, qui paraît avoir réussi le premier à employer les houilles sèches pour l'alimentation des foyers de chaudières à vapeur. L'expérience a été faite sur une chaudière à vapeur de la force de vingt chevaux, destinée à l'exploitation d'une mine de houille sèche des environs de Valenciennes. La grille, qui avait été disposée pour brûler de la houille grasse, a été abaissée de manière à se trouver à $0^m,50$ des bouilleurs, et on lui a donné 1 mètre sur $1^m,40$. Ensuite on a percé, dans une des parois latérales du cendrier, un orifice rectangulaire de $0^m,15$ de hauteur, et dont la largeur pouvait être augmentée ou diminuée à volonté au moyen de deux volets à coulisse; au centre de cet orifice, on a introduit un tuyau à vapeur de $0^m,015$ de diamètre, de 3 mètres de longueur, terminé par une tuyère de $0^m,005$ de diamètre (fig. 5 et 6, pl. 13). En donnant à la couche de combustible une épaisseur de $0^m,20$, en fermant la porte du cendrier, et en réglant convenablement l'orifice d'appel et le jet de vapeur, la combustion s'est très-bien soutenue, et le foyer est resté au rouge blanc. La vapeur se trouvait dans la chaudière à deux atmosphères et demie. On brûlait par heure 55 kilogr. de houille, et, par conséquent, $0^k,4$ par décimètre carré, et par heure. La quantité de vapeur consommée a été estimée à $\frac{1}{20}$ de celle qui était produite. L'effet utile n'a pas pu être apprécié, à cause de l'irrégularité du travail; mais il n'est pas douteux que quand l'épaisseur du combustible sera réglée de manière à ne point laisser dégager d'oxyde de carbone, et le moins d'oxygène libre possible, et que l'étendue de la surface de chauffe de la chaudière sera suffisante, on obtiendra de très-bons résultats.

Depuis, on a reconnu qu'une cheminée d'une section suffisante produit le même effet que le jet de vapeur. La chaudière dont nous venons de parler fonctionnant régulièrement depuis longtemps, on peut regarder comme bien constaté, que les houilles sèches dont il est question

peuvent très-bien brûler sur grilles, à la condition de donner aux grilles une grande surface, à peu près deux fois plus grande que celle des grilles à houilles ordinaires, d'employer des cheminées à grands tirages, et de donner à la couche de houille une épaisseur de 0,20.

653. Je regarde comme très-probable, que quand ces houilles seront mieux appréciées, qu'on connaîtra mieux les dispositions les plus convenables des foyers dans lesquels elles doivent être brûlées, elles seront préférées aux houilles grasses dans un grand nombre de cas, parce que les foyers à houilles sèches sont plus faciles à diriger que ceux à houilles grasses, et que les houilles sèches peuvent produire un plus grand effet utile sous le même poids que les autres houilles. Les foyers sont plus faciles à diriger, parce que l'épaisseur de la couche de combustible étant considérable, une petite variation d'épaisseur est sans influence, tandis qu'elle est très-grande dans les foyers à houilles qui produisent de la flamme. L'effet utile peut être plus grand, parce que les houilles sèches ne produisent point de carbures d'hydrogène, et qu'en donnant à la couche de combustible l'épaisseur convenable, on peut ne laisser échapper du foyer qu'une très-petite quantité d'oxygène libre.

654. Certains anthracites se comportent comme les houilles sèches dont nous venons de parler; mais la plupart sont d'une combustion plus difficile; ils se délitent sur la grille, et ne peuvent pas être remués, car ils se réduiraient en poussière qui obstruerait la grille ou passerait à travers les intervalles des barreaux; en outre, l'ouverture de la porte, et l'introduction du combustible froid, diminuent beaucoup l'activité de la combustion, et peuvent éteindre le foyer.

655. Lorsque les anthracites ne produisent pas de scories (mâchefer), et que les résidus sont pulvérulents, on peut les brûler sur grille comme les houilles sèches, dont nous avons parlé d'abord, en dégageant, de temps en temps, les cendres qui s'accumulent sur la grille, au moyen d'un crochet qu'on introduit par le cendrier entre les barreaux. Mais les barreaux de la grille doivent être minces et très-serrés, et l'épaisseur de la couche de combustible considérable.

656. Lorsque les anthracites produisent, outre les cendres, des scories qui ne peuvent pas passer à travers la grille, il faut la nettoyer de temps en temps, mais seulement en partie, pour qu'en rechargeant la grille le combustible puisse s'allumer.

657. Si le combustible ne produisait que des scories, il faudrait dégager la grille à des intervalles plus ou moins rapprochés; et alors il serait convenable, si le travail ne pouvait pas éprouver d'intermittence, d'employer deux foyers qui seraient nettoyés alternativement.

658. Lorsque l'anthracite brûle difficilement, et que l'on peut ne pas employer la chaleur rayonnante du combustible, il serait avantageux de couvrir le foyer d'une voûte, qui élèverait la température du foyer et favoriserait la combustion.

659. Enfin, dans le cas où le combustible serait en poudre, on ne pourrait le brûler qu'en le mettant en briquettes, après en avoir fait une pâte avec de l'argile.

660. Dans tous les cas, il sera indispensable de déterminer par des analyses de l'air brûlé, quelle doit être l'épaisseur de la couche de combustible, pour qu'il ne se forme point d'oxyde de carbone, et qu'il s'échappe le moins possible d'air sans altération.

661. Pour les anthracites qui donnent peu de résidus et qui se délitent dans le foyer, comme ceux du pays de Galles et d'Amérique, M. Player vient d'imaginer une disposition de foyer qui a parfaitement réussi. Le foyer de M. Player se compose d'une grille à barreaux étroits, au-dessus de laquelle se trouve un tube constamment rempli d'anthracite, qui, à partir de l'orifice inférieur, forme un talus qui s'étend jusqu'aux bords de la grille, de sorte que le combustible descend à mesure qu'il se consomme. Il n'y a point de porte à ouvrir et à fermer, par conséquent point de courant d'air froid sur le combustible, et l'anthracite étant échauffé progressivement à mesure qu'il descend, ne décrépite plus dans le foyer, et n'éteint plus celui qui est en ignition en le refroidissant. L'alimentation est régulière, et le chauffeur n'a d'autre travail à faire que de remplir de temps en temps la trémie qui surmonte le tube d'alimentation et de régler l'activité de la combustion par le registre de la cheminée. La figure 9 (pl. 13) représente cette disposition appliquée à une chaudière à vapeur à basse pression.

662. Une machine à vapeur a travaillé 72 heures consécutives avec un foyer à anthracite disposé comme nous venons de l'indiquer, sans qu'il ait été nécessaire de tisonner, de dégager la grille et de faire tomber les escarbilles. L'anthracite employé était menu sans être en poudre, et on le versait toutes les quatre heures dans la trémie. On avait placé de l'eau

dans le cendrier, pour obtenir un peu de flamme. On a établi, dans la même usine, cinq foyers de forgerons, disposés de la même manière, et un four destiné à fondre la fonte, qui tous ont donné de bons résultats. Depuis, on a appliqué la même disposition de foyers à des poêles et à des calorifères. Dans les foyers de forgerons, et les foyers à réverbère, le canal qui alimente le foyer de combustible, est placé latéralement. Dans les hauts fourneaux, à partir d'une certaine hauteur, il y a des cheminées latérales pour le dégagement des gaz, et on charge par le centre du gueulard. Le numéro 3 du *Technologiste* de 1839 contient des dessins microscopiques des différents appareils de M. Plàyer.

663. Les figures 10 et 11 (pl. 13) représentent deux coupes de la chaudière d'une machine à vapeur pour bateau, de la force de 24 chevaux, à une échelle de $\frac{1}{20}$, construite par M. Manby. La grille a une surface égale aux $\frac{5}{4}$ de celles qui sont ordinairement destinées à brûler le même poids de houille; le tube d'alimentation a une section égale à $\frac{1}{4}$ de celle de la grille.

Nous rapporterons un extrait d'un rapport de MM. J. Parkes et C. Manby, sur la chaudière du bateau à vapeur l'*Anthracite,* renfermant un foyer à anthracite. (Le *Technologiste*, tome I^er^, page 403.)

« D'abord, il est nécessaire de faire connaître que cette chaudière était disposée peu favorablement pour développer tout l'effet utile qu'on peut obtenir d'un combustible quelconque, attendu que ses dimensions étaient beaucoup trop restreintes, et avaient été établies pour s'accommoder à la grandeur du bâtiment. Nos expériences sur les poids relatifs de l'eau convertie en vapeur, avec des combustions plus ou moins vives, ont en conséquence été limitées par le faible tirage de la cheminée, et par la construction tubulaire de la chaudière. Néanmoins nous avons obtenu des résultats satisfaisants sous plusieurs points de vue, et qui fourniront quelques données utiles, pour établir sur de meilleures proportions les fourneaux des chaudières, et pour déterminer le mode le plus avantageux de construction des générateurs des bâtiments à vapeur, où l'on voudra faire usage de ce combustible. Les expériences qui suivent suffiront pour faire ressortir le pouvoir calorifique de l'anthracite, et en même temps les défauts de la chaudière sur laquelle on a opéré :

| NUMÉROS des expériences. | COMBUSTIBLE brûlé par mètre carré de grille et par heure. | EAU A 100° évaporée par heure. | EAU A 100° évaporée par 1 kilogramme d'anthracite. |
|---|---|---|---|
| | kilog. | kilog. | kilog. |
| 1 | 75 | 800 | 6,50 |
| 2 | 64 | 1015 | 8,25 |
| 3 | 16 | 378 | 12,27 |
| 4 | 14,80 | 393 | 13,48 |

« L'eau a été mesurée avec soin, au moyen d'un réservoir qui la jaugeait avant de la verser dans la chaudière, et on a noté chaque fois la température de cette eau d'alimentation, température qui a varié dans les différents jours de l'expérience, mais qui, par les calculs, a été ramenée au cas où cette eau d'alimentation aurait été à 100° centigrades, ou au point d'ébullition. Cette précaution de ramener l'eau à une température uniforme nous a paru nécessaire pour comparer avec exactitude le travail fait par l'anthracite avec celui que fournissent des expériences faites sur des houilles bitumineuses, et avec d'autres chaudières où l'eau d'alimentation a été constamment ramenée de même à la température fixe de 100°.

« Avant d'établir une comparaison entre nos expériences et celles qui ont eu lieu sur les houilles bitumineuses, nous ferons remarquer que la deuxième expérience est celle où la combustion et l'évaporation sont nécessaires pour faire marcher la machine du bâtiment. Un essai fait en mélangeant du coke fort de fonderie, provenant de la houille de Pontop, a donné les mêmes résultats, mais avec le désavantage commun à l'emploi du coke en général, quand on le fait brûler rapidement, savoir, de former en grande abondance des escarbilles sur la grille. Sous tous les autres rapports, ce coke s'est montré très-efficace; il a bien descendu avec l'anthracite dans les tuyaux d'alimentation de M. Player, et s'est étendu bien uniformément sur la grille.

« Après nous être assurés que cette chaudière était insuffisante dans ses dimensions pour absorber toute la chaleur du foyer, tandis que la machine était en fonction, nous avons cherché à obtenir par simple

évaporation des résultats propres à déterminer le pouvoir calorifique réel de l'anthracite. Nous croyons avoir, jusqu'à un certain point, atteint ce but, par l'application d'un registre qui, en diminuant à volonté le courant d'air dans le foyer et le tuyau de la cheminée, a permis de conserver plus longtemps autour de la chaudière la chaleur produite. En comparant la première avec la quatrième expérience, on verra que plus de la moitié de la chaleur était générée en pure perte dans le premier cas, et qu'elle passait par les tubes de la chaudière sans produire aucun effet, lorsque la cheminée était entièrement ouverte, tandis qu'il en a été tout autrement dans le second cas, où les deux tiers de la section de la cheminée étaient fermés.

« Un coup d'œil sur le tableau précédent fait donc voir la perte énorme qui a lieu par une combustion rapide, lorsque la chaudière est d'une trop faible longueur, et lorsque, comme dans le cas actuel, les tubes qui conduisent la chaleur de la caisse à feu dans la cheminée, n'ont que 1 mètre de longueur, et que l'espace total parcouru par la chaleur ne s'élève pas au delà de 2 mètres.

« Par suite du séjour peu prolongé de la chaleur autour de la chaudière, dans la première et dans la seconde expérience, les produits de la combustion entraient dans la cheminée à une température capable de fondre le zinc. Un thermomètre à mercure, introduit de temps à autre dans la cheminée au-dessous du registre, n'est descendu qu'une seule fois à 232°; les produits qui s'échappaient ordinairement étaient au-dessus du point d'ébullition du mercure, même dans les expériences troisième et quatrième.

« En comparant la moyenne des expériences dans lesquelles le résultat est le plus élevé, avec celle des expériences où il l'est le moins, on voit qu'en augmentant la rapidité du tirage dans le rapport de 4,37 à 1, l'évaporation, dans des temps égaux, ne s'est accrue que dans le rapport de 2,50 à 1, tandis que le pouvoir évaporant de poids égaux de combustible a diminué dans le rapport de 1,74 à 1.

« Des expériences faites sur les chaudières des machines du Cornwall avec de la houille du pays de Galles, démontrent qu'avec une consommation semblable à celle de notre expérience n° 4, c'est-à-dire 14 : 80 kilogrammes par mètre carré de grille par heure, le produit de l'évaporation a été de 11,89 litres d'eau à 100° pour 1 kilogramme de combus-

tible. Par conséquent, pour une même consommation, l'anthracite surpasse la houille du pays de Galles dans le rapport de 13,48 à 11,89, ou de 13 pour 100. Mais les aires relatives des surfaces qui doivent absorber la chaleur, la durée du contact de cette chaleur sur ces surfaces, et les conditions de rayonnement des parties extérieures dans les chaudières respectives, circonstances qui toutes, comme on sait, ont la plus grande influence sur la réalisation d'un grand effet utile; tout enfin est tellement en faveur des chaudières du Cornwall, quand on vient à les comparer avec celle du bâtiment l'*Anthracite*, qu'on est autorisé à conclure que si nos expériences eussent été faites dans des circonstances aussi favorables que celles propres aux chaudières du Cornwall, les résultats eussent été considérablement plus élevés que ceux que nous avons obtenus.

« Ce fait sera d'ailleurs évident, en comparant les chaudières qui ont produit ces effets relatifs. Les chaudières du Cornwall présentaient une surface de chauffe de 89,18 mètres carrés, et celle du bateau à vapeur l'*Anthracite* de 31,60 pour recevoir en temps égaux la chaleur générée par des poids égaux de houille dans un cas, et d'anthracite dans l'autre; c'est-à-dire qu'il y avait en faveur des premières le rapport de 2,44 à 1. La rapidité de la combustion, et par conséquent celle du courant de chaleur dégagée sur les grilles, étaient égales. La distance parcourue ou le circuit fait par la chaleur, après avoir abandonné la grille, était de 51 mètres dans les chaudières du Cornwall, et de 1 mètre dans la chaudière de l'*Anthracite;* le temps de la durée du contact de la chaleur sur des surfaces égales, deux fois et demie plus considérable dans les premières que dans la seconde. Enfin, les chaudières du Cornwall étaient revêtues d'une bonne chemise de matières non conductrices, tandis que celle de l'*Anthracite* n'avait aucune enveloppe protectrice contre les pertes par rayonnement.

« En prenant en considération ces différences, et leur influence sur l'économie de l'évaporation, nous croyons que, toutes circonstances égales, l'anthracite surpasse de beaucoup toutes les houilles bitumineuses en valeur calorifique, puisqu'il a déjà présenté, dans des circonstances comparativement défavorables, un résultat de 13 pour 100 au-dessus de celui qu'on a considéré jusqu'ici comme le plus élevé de tous ceux obtenus.

« Avec les houilles de New-Castle et du Staffordshire, le pouvoir

évaporant le plus élevé qu'on ait obtenu est celui observé à Warwick, de 10,32 kilog. d'eau à 100° pour 1 kilog. de houille consommé, et là les chaudières sont conduites avec assez de soin pour qu'on puisse considérer ce résultat, avec le même combustible, comme à peu près impossible à dépasser dans la pratique ordinaire. Or, notre expérience n° 4 avec l'anthracite, malgré tous les désavantages dont il a été parlé plus haut, a surpassé le produit de Warwick de 30 pour cent.

« La construction particulière de la chaudière du bâtiment l'*Anthracite* s'est opposée à ce que nous pussions entreprendre aucune expérience avec des charbons bitumineux, parce que les tubes s'engorgeaient de suie et que le combustible se collait et s'agglomérait de telle sorte, que la colonne qui remplissait le tube d'alimentation ne descendait plus et ne chargeait plus la grille où elle ne pouvait parvenir. Néanmoins, nous nous sommes assurés, dans un petit voyage de courte durée, et en alimentant comme à l'ordinaire par la porte du foyer, que la houille de Pontop produisait assez de vapeur pour le service des machines.

« Quant au mode adopté par M. Player pour alimenter les grilles avec de l'anthracite, nous dirons qu'il ne laisse rien à désirer, qu'il dispense de tout moyen mécanique et du travail du tisonnage si pénible sur les bâtiments à vapeur, et prévient des pertes et des accidents provenant de l'alimentation à la pelle par la porte du foyer. Dans aucune de nos expériences, excepté dans le cas où l'on a cherché à se procurer une combustion excessivement rapide, il n'a été nécessaire de toucher au feu ou de soulever les barreaux de la grille pendant toute la journée. Il ne s'est pas formé de suie par la combustion même la plus vive, et la quantité de cendres a été très-faible.

« Ce mode d'alimentation du foyer jouit encore d'un avantage très-précieux dans la pratique, savoir, une uniformité dans la production de la vapeur que rien ne saurait égaler. Avec le registre, notre réservoir de 200 litres était vide dans des temps si près d'être égaux, qu'ils ne variaient pas d'une seule minute sur plusieurs heures, quand on ne touchait pas à ce registre, et le combustible descendait avec une extrême précision proportionnellement à la rapidité de la combustion qui avait été réglée.

« Quant aux avantages qui résultent de ce que l'anthracite ne produit ni fumée, ni effluve désagréable, qu'il ne couvre pas le pont de particules

de fumée, ils sont trop évidents pour qu'il soit nécessaire d'insister ici sur leur importance. »

664. Les résultats obtenus dans les expériences dont nous venons de parler, relativement à la quantité d'eau vaporisée (page 270), sont certainement beaucoup trop forts, car ils dépassent celui qui proviendrait de la puissance calorifique du combustible, et cependant on n'a pas tenu compte de la quantité de chaleur perdue par la surface extérieure de la chaudière, ni de celle que l'air brûlé entraînait avec lui en pénétrant dans la cheminée. L'accroissement d'effet obtenu lorsque la consommation de combustible était réduite à 14$^{k}$,80 par heure et par mètre carré de grille, que les auteurs du mémoire attribuent à la surface de chauffe, provient beaucoup plus de ce que, pour cette faible consommation, une moindre quantité d'air échappait à la combustion.

665. Je regarde les foyers de M. Player comme bien préférables à tous les autres pour les combustibles qui brûlent sans flamme, mais il faudrait déterminer, pour une consommation de combustible donnée, quelles devraient être la surface de la grille et l'épaisseur de la couche de combustible, pour qu'il ne se formât point d'oxyde de carbone et pour qu'une faible quantité d'air échappât à la combustion.

## § 7. — FOYERS DANS LESQUELS LA COMBUSTION EST PRODUITE PAR DES COURANTS D'AIR A GRANDE VITESSE.

666. Dans les foyers dont il est question, le mouvement de l'air est produit par de larges et hautes cheminées, ou par des machines. Ces foyers ont toujours pour objet de produire, au milieu de la masse de combustible, une température très-élevée; ils sont toujours alimentés par des combustibles qui brûlent sans flamme, et la couche de combustible a toujours une grande épaisseur.

667. Pour comprendre l'influence des courants d'air à grande vitesse, et celle d'une grande épaisseur de la couche de combustible, examinons d'abord ce qui se passe dans un foyer ordinaire. Supposons la grille couverte d'un combustible qui brûle sans flamme, et le tirage de la cheminée tel que la moitié de l'air échappe à la combustion; c'est, comme on sait, ce qui arrive dans les foyers ordinaires. S'il n'y avait pas de chaleur rayonnée, toute la chaleur se dissiperait par le courant d'air, le com-

bustible et l'air seraient à des températures peu différentes, qui, pour le charbon de bois et le coke, s'éloigneraient peu de 1300°. Mais comme il y a toujours de la chaleur perdue par rayonnement, la température du foyer et de l'air sera beaucoup moins élevée. Supposons maintenant qu'on emploie un foyer à petite grille environné de matières non conductrices et une grande hauteur de combustible, la perte de chaleur par rayonnement sera très-petite; et si l'épaisseur du combustible est telle que l'air, en arrivant à la partie supérieure de la masse en ignition, soit complétement dépouillé d'oxygène, il est facile de voir que la température du foyer et de l'air sera sensiblement double de celle de l'air et du combustible dans les foyers ordinaires, et qu'elle ne devra pas s'éloigner beaucoup de 2000°.

668. Mais on n'obtient jamais ainsi une très-haute température dans un foyer qu'en produisant une certaine quantité d'oxyde de carbone, et par conséquent qu'en utilisant très-mal le combustible consommé, d'autant plus que toujours l'air brûlé est abandonné dans la cheminée à une très-haute température.

## § 8. — FOYERS A AIR CHAUD.

669. La substitution de l'air chaud à l'air froid dans les hauts fourneaux et dans les forges, a produit partout une très-grande économie de combustible, et en même temps un grand accroissement dans la production journalière. On a d'abord expliqué cet effet par l'élévation de température qui résultait de l'emploi de l'air chaud. M. Berthier en a donné une autre raison généralement admise : elle repose sur l'hypothèse bien probable que l'affinité de l'air chaud pour le charbon est beaucoup plus grande que celle de l'air froid, et que, lorsqu'on emploie de l'air chaud, ce gaz se trouve entièrement dépouillé d'oxygène dans un très-court chemin. D'après cette hypothèse, la combustion se trouve à peu près concentrée dans le creuset; la température y est alors beaucoup plus élevée que par l'emploi de l'air froid, et par suite moins élevée au delà; circonstances qui toutes deux sont favorables à l'économie du combustible; car la haute température qui, dans l'emploi de l'air froid, se produit au-dessus du creuset par la continuité de la combustion, paraît être sans utilité. Cette explication se trouve appuyée par ce

fait bien constaté, que la température de l'air chaud doit être d'autant moins élevée que le combustible a plus d'affinité pour l'oxygène. Ainsi, 150 à 250° suffisent pour les fourneaux chauffés au charbon de bois, tandis qu'il en faut plus de 300 pour ceux qui sont chauffés au coke, et il est probable que l'anthracite exigerait une température encore plus élevée.

670. On ne sait pas quelle serait l'influence de l'air chaud dans les foyers ordinaires, du moins avec injection sous la grille, aucune expérience n'ayant été tentée à ce sujet. D'ailleurs les résultats, fussent-ils aussi avantageux qu'on pourrait l'espérer, ce mode d'alimentation ne devrait pas être employé, à cause de la prompte altération qu'il ferait éprouver aux grilles. Mais l'injection de l'air chaud au delà du foyer dans une direction qui ne serait pas celle de la fumée, aurait certainement l'avantage de brûler les gaz combustibles par son action directe et par le mélange que le mouvement de l'air injecté produirait dans les veines d'air et des gaz émanés du foyer.

## § 9. — FOYERS A GOUDRON.

671. Depuis quelque temps, les fabricants du gaz destiné à l'éclairage ont cherché à employer comme combustible le goudron qui se produit dans la distillation de la houille. On imagina d'abord de verser le goudron sur du coke placé sur la grille (fig. 2, pl. 14). Mais une grande partie du goudron était volatilisée sans être brûlée; et comme la température du foyer était très-grande, la partie de la cornue qui était au-dessus de la grille était promptement altérée. On a alors employé les deux dispositions suivantes, qui toutes deux ont donné de bons résultats. Dans certaines usines, on a muré l'orifice du cendrier, on a enlevé la grille, et on a rempli le cendrier de coke de manière qu'il s'élevât à une hauteur un peu plus petite que l'emplacement de la grille, et on a fait tomber le goudron en filet très-fin sur le coke. L'air nécessaire à la combustion pénètre par un orifice au centre duquel passe le tuyau à goudron (fig. 3, pl. 14). Par cette disposition, 100 kilog. de goudron produisent l'effet de 3 hectolitres combles de coke, ou de 100 kilog. de coke.

672. Dans d'autres usines, on brûle le goudron dans une cuiller de 10 à 15 centimètres de diamètre (fig. 3); le courant d'air s'introduit,

comme dans la première disposition, par une ouverture qui donne passage au tuyau à goudron. En réglant convenablement l'orifice d'entrée de l'air, on parvient à brûler le goudron assez complétement, et l'effet produit est à peu près le même que dans l'appareil précédent.

Il est très-probable que, dans ces deux dispositions, on ne brûle la fumée qu'à la condition de faire passer sur le goudron un grand excès d'air, et qu'on obtiendrait un effet utile beaucoup plus grand si on parvenait à diminuer cet excès.

673. On avait proposé de brûler le goudron dans des appareils analogues aux becs de lampes, en maintenant le goudron à la même hauteur au moyen d'un réservoir à niveau constant (fig. 4, pl. 14); mais les tubes, nécessairement très-étroits, auraient probablement été obstrués, et je doute que, sans un courant d'air forcé, on eût réussi.

674. Je pense que le meilleur moyen de brûler le goudron consisterait à le faire arriver dans un godet en fonte traversé par un large tube vertical du même métal fermé à la partie supérieure, communiquant par la partie inférieure avec une machine soufflante, et percé latéralement d'un grand nombre de petits orifices dirigés horizontalement. L'air n'étant admis que par le tube, sortirait chaud et par des jets horizontaux qui, traversant la fumée, la brûleraient facilement et avec beaucoup moins de dépense d'air que par les procédés employés. L'appareil placé dans le foyer s'altérerait peu, à cause du courant d'air qui refroidirait constamment le métal; d'ailleurs le prix en serait si peu élevé, qu'un remplacement même assez fréquent serait sans inconvénient. A la vérité, cet appareil exigerait l'emploi d'un ventilateur, et par conséquent d'une force motrice, mais celle-ci serait peu considérable, même pour une très-grande usine; d'ailleurs, il y a tant de chaleur perdue dans la fabrication du gaz, qu'il serait très-facile, en utilisant une partie de cette chaleur, d'alimenter de vapeur la petite machine qui ferait mouvoir le ventilateur.

## § 10. — FOYERS A GAZ.

675. Les gaz qui s'échappent par le gueulard des hauts fourneaux ayant traversé une grande épaisseur de combustible, renferment une très-grande quantité d'oxyde de carbone qui, en se transformant en

acide carbonique, peut développer une grande quantité de chaleur (271).

676. M. Haubertot, habile maître de forge français, est le premier qui ait essayé d'utiliser les gaz combustibles qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux. En 1814, M. Berthier fit sentir toute l'importance de cette découverte. Depuis, ces gaz ont été employés successivement au grillage des minerais, à l'échauffement de l'air d'alimentation des hauts fourneaux, à la formation de la vapeur nécessaire aux machines soufflantes, à la dessiccation du bois, à la fabrication du charbon roux, et enfin, récemment, au chauffage des fours à pudler. Les applications les plus importantes, celles du chauffage des chaudières à vapeur et des fours à pudler, ont été faites par MM. Thomas et Laurens.

677. Pour recueillir les gaz qui se dégagent des hauts fourneaux, on place dans le gueulard un cône en fonte ouvert par les deux bouts, et garni à la partie supérieure d'un rebord qui s'appuie sur ses parois; c'est dans cette trémie qu'on verse les charges de combustible et de minerai. La prise de gaz a lieu dans la paroi supérieure du fourneau, derrière la trémie; les gaz s'échappent librement de cet espace avec une certaine vitesse.

A l'origine, on s'est borné à faire arriver les gaz dans un canal où l'air avait un libre accès; mais beaucoup de gaz échappait à la combustion.

678. Plus tard, MM. Thomas et Laurens employèrent les dispositions représentées par les figures 6, 7 et 8 (pl. 14). La première représente une coupe longitudinale de l'appareil; la seconde sa projection horizontale, et la dernière une coupe horizontale par le plan *mn* (fig. 6). L'appareil de combustion se compose d'une caisse rectangulaire en fonte ABCD, dont la face supérieure MN, inclinée, est percée d'un grand nombre de petits orifices circulaires. Les rangées de trous sont séparées les unes des autres par des plaques de fonte qui forment des espaces fermés à la partie inférieure, et ouverts en dessus et en avant, par lesquels l'air extérieur passe. *ab* est une grille sur laquelle on brûle quelques copeaux pour allumer les gaz. Par cette disposition, les gaz et l'air arrivent dans le foyer en lames minces alternatives. On obtient ainsi de meilleurs résultats que par l'ancienne méthode; mais il y a encore une grande quantité d'air qui échappe à la combustion.

679. Les mêmes ingénieurs ont reconnu depuis que, quelle que soit

la disposition de l'appareil, on n'obtient jamais une combustion complète par le seul effet du tirage d'une cheminée, parce qu'il tend à donner la même vitesse à l'air et aux gaz combustibles; qu'il faut nécessairement injecter directement le gaz dans l'air, ou l'air dans le gaz; qu'une pression de 10 à 15 centimètres d'eau suffit; que le volume d'air nécessaire pour brûler complétement les gaz d'un haut fourneau est à peu près égal aux $\frac{4}{5}$ du volume d'air introduit dans le haut fourneau; et qu'enfin on obtient de plus grands effets en chauffant préalablement l'air ou les gaz, ou tous les deux.

680. Les figures 9 et 10 (pl. 14) représentent le nouveau foyer à gaz employé par MM. Thomas et Laurens pour le chauffage des fours à pudler, au moyen des gaz qui se dégagent des hauts fourneaux. La première est une coupe verticale de l'appareil; la seconde une coupe horizontale suivant *ab* (fig. 9). L'air extérieur est poussé par une machine soufflante, et parcourt des tuyaux de fonte chauffés par l'air brûlé à sa sortie du fourneau; il arrive par le tuyau AB dans la caisse rectangulaire en fonte BC, d'où il s'échappe par un grand nombre de petits tubes *ab, ab*. Le gaz du haut fourneau, après s'être également échauffé, arrive dans une caisse en fonte CD, placée au-dessus de la première, par un tuyau MN; le couvercle de cette caisse est garni d'un grand nombre de tuyaux en fonte *mn* concentriques aux tubes à air, mais dans lesquels les extrémités de ces derniers ne s'élèvent que jusqu'à une certaine hauteur. La pression de l'air est de 15 à 20 centimètres d'eau, celle des gaz combustibles de 5 à 6; la température de l'air est de 400 à 500°, celle des gaz de 200 à 300. Par cette disposition, on obtient une très-bonne combustion, on règle avec une extrême facilité les volumes relatifs d'air et de gaz qui arrivent dans les becs, et on rend à volonté les flammes oxydantes ou désoxydantes. Nous reviendrons plus tard sur ces appareils, en parlant du chauffage des corps solides.

## § 11. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FOYERS.

681. Les foyers à grilles fixes horizontales, ou peu inclinées, avec une alimentation intermittente, laissent peu à désirer pour les combustibles qui brûlent sans flamme, tels que le charbon de bois, le coke, les houilles sèches et certains anthracites; pourvu toutefois que

l'épaisseur de la couche de combustible soit convenable. On parviendrait même facilement, par quelques analyses de l'air brûlé, à déterminer l'épaisseur que doit avoir la couche de combustible, pour qu'il ne se forme point d'oxyde de carbone, et pour qu'il ne se dégage que peu d'air sans altération. Mais, pour produire un bon effet utile, il faut que ces foyers brûlent toujours la même quantité de combustible, car des variations dans la consommation, produites par les mouvements du registre, et qui ne peuvent pas être accompagnées des variations qui seraient nécessaires dans l'épaisseur de la couche de combustible, occasionnent toujours ou le passage d'un plus grand volume d'air inutile à la combustion, ou la formation d'une certaine quantité d'oxyde de carbone.

682. Pour les houilles sèches, et les anthracites qui laissent peu de résidus, les foyers à alimentation continue sont aussi parfaits qu'on peut le désirer, quand l'épaisseur de la couche de combustible est convenable.

683. Les foyers à flamme renversée pour le bois et la tourbe, sont faciles à établir et à diriger, ils produisent une bonne combustion et ne laissent point dégager de fumée; mais il est probable qu'ils appellent un grand excès d'air, qu'il est impossible de modérer. Il est probable aussi que, dans ces foyers comme dans les précédents, les variations de tirage, produits par le registre, doivent occasionner des pertes d'effet utile par les mêmes causes, et qu'en définitive ils ne doivent pas avoir un grand avantage sur les foyers à grille, dans lesquels on peut faire varier à volonté la masse de combustible en ignition.

684. Pour les houilles grasses, ou du moins pour les houilles flambantes ordinaires, les foyers à grilles fixes et à alimentation intermittente, malgré leurs inconvénients, doivent être préférés aux autres dispositions qui ont presque toutes des inconvénients plus graves que ceux qu'elles évitent. Mais pour ces combustibles, encore moins que pour les autres, on n'obtiendra de bons effets utiles qu'autant que le travail sera uniforme et que la surface de la grille, le tirage et l'épaisseur du combustible seront convenables, et il n'est pas douteux que toutes ces circonstances doivent varier avec la nature de la houille et la grosseur des morceaux de combustible, et qu'elles ne peuvent être déterminées que par des expériences directes.

685. Ces essais seraient très-importants, surtout dans les grands systèmes de chaudières à vapeur; car je suis convaincu que, dans un grand nombre, on perd plus du tiers de la chaleur produite, principalement par l'introduction d'un trop grand excès d'air. C'est évidemment à cette circonstance qu'il faut attribuer ce fait singulier, observé par un grand nombre d'ingénieurs, que, dans certaines chaudières à vapeur, l'effet produit par les surfaces qui ne sont chauffées que par le contact de l'air brûlé, n'est qu'une très-petite partie de celui qui est produit par les surfaces chauffées par rayonnement.

Mais pour les petits appareils, et pour ceux dans lesquels le chauffage n'est pas uniforme, on doit s'en tenir aux dimensions ordinaires des foyers.

686. Il est important de remarquer, comme nous l'avons déjà dit, que les foyers les mieux disposés sous tous les rapports pour produire le meilleur effet utile, perdent complétement leurs avantages, quand on augmente ou quand on diminue la consommation de combustible. Ainsi, il n'y a réellement pas de bons foyers à corps solides, c'est-à-dire, de foyers dans lesquels on puisse régler facilement et immédiatement le volume d'air nécessaire à la combustion. Les foyers à gaz, disposés comme nous l'avons dit (680), jouissent seuls de cette propriété.

687. Les avantages de ces foyers, bien constatés dans le chauffage des fours à pudler, où l'on a employé les gaz qui sortent du gueulard des hauts fournaux, ont conduit MM. Thomas et Laurens à convertir d'abord les combustibles en oxyde de carbone, et à brûler ensuite ces gaz dans les appareils dont ils se sont servis pour brûler ceux qui se dégagent des hauts fourneaux. Voici les dispositions auxquelles ils se sont arrêtés:

688. Quand le combustible n'est pas de nature à éprouver au feu de fusion pâteuse, il est placé dans un fourneau ayant la forme d'une tour circulaire, fermée à la partie supérieure par une trémie destinée à y verser le combustible. L'air est lancé dans le fourneau par un ou plusieurs jets de vapeur; des robinets permettent de régler les quantités relatives d'air et de vapeur. On trouve facilement par le calcul qu'en introduisant des poids d'air et de vapeur qui soient dans le rapport de 35 à 1, la chaleur développée par la formation de l'oxyde de carbone est suffisante pour décomposer l'eau et pour donner à tous les gaz la tempé-

rature de 500°. Du fourneau les gaz arrivent directement dans le foyer où ils sont brûlés, par le simple appel d'une cheminée; la quantité de vapeur à 5 atmosphères, qui est introduite avec l'air, étant suffisante pour produire dans les gaz, à la sortie du fourneau, la pression nécessaire à une bonne combustion. La trémie qui se trouve à la partie supérieure du fourneau est garnie de deux soupapes placées l'une au-dessus de l'autre, et qui sont destinées à intercepter toute communication entre l'intérieur du fourneau et l'air extérieur quand on fait tomber le combustible. Pour cela, on commence par remplir de combustible l'intervalle fermé par les deux soupapes; on chasse l'air de cet espace par un jet de vapeur, et en ouvrant la soupape inférieure on fait tomber la charge. Le fourneau doit avoir assez de hauteur pour que tout l'oxygène de l'air soit transformé en oxyde de carbone. A la partie inférieure du fourneau, se trouvent des ouvertures ordinairement fermées, qui servent à enlever de temps en temps les scories qui ont pu se former.

689. Cette disposition est applicable au bois, au charbon de bois, à la tourbe, au coke, aux houilles sèches et aux anthracites en fragments assez volumineux.

690. Pour les houilles sèches et les anthracites en poudre, MM. Thomas et Laurens se proposent de les mouler en briques en les mêlant avec de l'eau et un quinzième d'argile Ces briquettes, séchées d'abord à l'air, et ensuite par un courant d'air chaud, se comporteront évidemment comme du coke; seulement, elles donneront lieu à des scories plus volumineuses, qu'il faudra enlever plus fréquemment du fourneau.

691. Pour les houilles grasses, qui s'agglomèrent fortement au feu, la disposition indiquée présenterait un grave inconvénient : la houille, à la partie supérieure du fourneau, formerait des masses compactes que l'air traverserait difficilement, et qui pourraient rester suspendues dans le fourneau. Cet inconvénient peut être évité de plusieurs manières : 1° en mélangeant les houilles grasses, dans certaines proportions, avec du coke ou des houilles sèches; 2° en employant des houilles grasses menues, dont on aurait préalablement formé des briquettes, en les mêlant avec une quantité convenable d'argile.

692. Enfin, les combustibles sulfureux sont mêlés avec de la chaux qui donne naissance à des sulfures qui passent dans les laitiers.

693. Si cette nouvelle manière de brûler les combustibles ne présente pas de difficultés imprévues, elle sera d'un grand avantage dans la métallurgie et dans un grand nombre d'industries, car elle permettra d'employer indistinctement tous les combustibles pour les opérations qui exigent de la flamme, une haute température, et des gaz non sulfureux. Elle offrira, en outre, le moyen d'utiliser une immense quantité de houilles sèches et d'anthracites menus, sans usage à cause de leur état pulvérulent, et de tourbes et de combustibles fossiles de toute espèce, sans usage à cause de la nature ou de la grande quantité de matières étrangères qu'ils renferment. Avec ce mode de combustion, tous les combustibles auraient réellement la valeur que leur assignent les quantités de carbone et d'hydrogène en excès qu'ils contiennent.

# CHAPITRE VIII.

## TRANSMISSION DE LA CHALEUR.

694. Dans les chapitres qui précèdent nous avons examiné les différents modes de tirage et les différentes formes de foyers ; il nous reste, pour terminer les considérations générales qui doivent précéder l'examen détaillé des différents usages de la chaleur, à parler de la transmission de la chaleur, rayonnée par le foyer ou entraînée par le courant d'air, dans les corps qui doivent être échauffés.

695. Dans quelques cas, la chaleur de l'air brûlé est absorbée directement par le corps qui doit être échauffé, comme dans les fours à briques, à chaux, et dans les hauts fourneaux. Mais dans un grand nombre de cas, la chaleur ne peut être transmise au corps qu'on veut échauffer que par un corps intermédiaire ; c'est ce qui arrive pour le chauffage de l'air et des liquides, pour la formation de la vapeur. D'autres fois la chaleur passe dans un liquide ou dans de la vapeur, et de ces corps dans d'autres, ou directement, ou à travers des plaques métalliques.

696. Dans tous les cas, lorsqu'il n'y a pas mélange immédiat du corps qui transmet la chaleur et du corps échauffé, le premier s'écoule d'une manière continue ; il est alors important pour l'économie du combustible que l'autre corps marche aussi d'une manière continue, mais en sens contraire ; car il est évident que si les chemins parcourus sont assez longs, il pourra y avoir échange complet de température ; le corps échauffant sortira à la température primitive du corps à échauffer, et ce dernier pourra avoir à sa sortie la température primitive du corps échauffant.

Cet échange complet ne peut presque jamais avoir lieu, parce qu'en

général il exigerait des surfaces de transmission trop étendues, et que toutes les fois que le corps échauffant est de l'air brûlé, il faut qu'il conserve à sa sortie du fourneau une température assez élevée pour produire le tirage nécessaire à la combustion dans le foyer, à moins cependant que le tirage n'ait lieu par une action mécanique.

697. Dans le cas où l'échange complet ne peut pas avoir lieu, il est cependant encore avantageux de faire marcher les deux corps en sens contraire. En effet, par cette disposition, dans tous les points du trajet le corps échauffant est à une température plus élevée que le corps qui s'échauffe, et, par conséquent, il y a transmission de chaleur dans tout le trajet, et toute la surface de chauffe est utilisée. Mais il n'en est plus ainsi quand les deux corps marchent dans le même sens : d'abord, la différence de leurs températures est très-grande, mais elle diminue rapidement par le refroidissement de l'un et le réchauffement de l'autre, et aussitôt que l'équilibre de température est établi, il subsiste pendant tout le reste du chemin, quel qu'il soit d'ailleurs. Ainsi, d'une part, le corps à échauffer ne peut prendre qu'une température beaucoup plus basse que celle du corps échauffant, et au delà d'une certaine limite d'étendue la surface de chauffe est sans utilité.

698. Pour rendre ceci plus clair, supposons qu'il s'agisse de chauffer de l'air au moyen d'un tuyau horizontal parcouru par de la fumée. Supposons que l'air soit renfermé dans un canal enveloppant et qu'il se meuve en sens contraire; il est évident que si la vitesse des deux gaz est convenable et si les tuyaux ont une suffisante longueur, il y aura échange complet de température à la sortie, et que pour une plus petite longueur ou un accroissement de vitesse de l'air brûlé, ce dernier pourra sortir à une température assez élevée pour qu'en se dégageant par une cheminée verticale, sa force ascensionnelle soit suffisante pour déterminer son mouvement dans le canal. Mais si l'air se mouvait dans le même sens que la fumée, bientôt l'air aurait acquis la température de la fumée, refroidie par sa marche antérieure, et les deux gaz cheminaient ensuite en conservant la même température. Il en serait de même pour l'échauffement des gaz, des liquides et des solides, par des gaz ou des liquides chauds.

699. *Influence de la nature et de l'épaisseur des lames destinées à transmettre la chaleur d'un fluide dans un autre.* Lorsqu'une plaque

d'un corps homogène est terminée par deux surfaces planes parallèles, maintenues chacune à une température constante, on admet que la quantité de chaleur qui traverse la plaque est proportionnelle à la différence de température de ses faces, et en raison inverse de son épaisseur; mais ces deux lois n'ont point été vérifiées directement, et on ne connaît la valeur du coefficient de conductibilité pour aucun corps. Il était important cependant de faire cette vérification; car on conçoit facilement que, si les lois dont il est question étaient exactes, elles auraient la plus grande influence sur la forme et les dimensions des appareils destinés à transmettre la chaleur d'un fluide à un autre à travers des enveloppes métalliques. J'ai fait à ce sujet un grand nombre d'expériences dont je rapporterai un résumé succinct.

Dans les traités de physique on indique un moyen très-simple, du moins en apparence, pour déterminer le nombre d'unités de chaleur qui passent à travers une lame métallique dont les deux surfaces sont maintenues à des températures constantes. Ce moyen consiste à prendre un vase métallique d'une épaisseur uniforme, qu'on environne de glace et dans lequel on fait arriver de la vapeur d'eau; de la quantité de glace fondue on déduit la quantité de chaleur qui a traversé le métal pendant la durée de l'expérience, pour une différence de température de 100°; et de l'étendue et de l'épaisseur connues du métal on déduit la quantité de chaleur qui traverserait dans l'unité de temps une plaque ayant une étendue égale à l'unité de surface, une épaisseur égale à l'unité de longueur, et pour une différence de température égale à 1°.

700. J'ai rejeté l'emploi de la glace, comme offrant trop de causes d'erreur, et j'ai d'abord employé la disposition suivante. Deux vases concentriques en fer-blanc, l'un de $0^m,15$, l'autre de $0^m,30$ de diamètre, étaient rétrécis par leur partie inférieure, de manière à n'avoir plus que $0^m,08$ et $0^m,12$ de diamètre; l'intervalle qui les séparait par le bas était fermé par un anneau en liége, et le vase intérieur était fermé par une plaque métallique circulaire de même diamètre, maintenue à distance du bord inférieur du vase par trois petites tiges soudées à sa circonférence et enfoncées dans le liége annulaire; du mastic de vitrier recouvrait l'intervalle, le contour de la plaque et la surface inférieure du liége; l'intervalle des deux cylindres était rempli de coton cardé. Le vase intérieur était rempli d'eau, dont on pouvait mêler les différentes

couches au moyen d'un agitateur muni d'un grand nombre d'ailes inclinées, et qui portait dans son axe un thermomètre à long réservoir : ce vase était fermé à la partie supérieure par quatre plaques de verre superposées. Au-dessous de la plaque métallique se trouvaient deux cylindres concentriques, l'un de 8, l'autre de 2 centimètres de diamètre ; ce dernier était terminé vers le haut par un entonnoir dont les bords n'atteignaient pas la circonférence du cylindre extérieur ; le tube extérieur était maintenu à distance de la plaque métallique par une bande de taffetas ciré fortement ficelée autour du tube et de la plaque. Par cette disposition, en faisant arriver de la vapeur par le tube central, elle s'épanouissait uniformément dans l'entonnoir au-dessous de la plaque, et sortait par l'intervalle compris entre les bords de l'entonnoir et le tube enveloppant. L'inclinaison de l'entonnoir, sa distance à la plaque et la distance de son contour au tube extérieur, avaient été calculées de manière que la veine de vapeur conservât toujours la même section.

Voici maintenant la marche qui a été suivie dans les observations. On faisait arriver un grand excès de vapeur dans le tube central placé au-dessous de la plaque ; on agitait régulièrement le liquide, et quand sa température était à peu près de 25°, on comptait, avec un chronomètre, les temps du réchauffement de 5 en 5°.

En admettant que les quantités de chaleur qui traversaient la plaque soient en raison directe de la différence de température de ses deux surfaces, l'accroissement de température que produirait pendant une seconde une différence de température de 1°, serait donné par la formule

$$a = \frac{m}{t}(\log A - \log T),$$

dans laquelle $m$ représente le module, A et T les excès de température de la vapeur sur celle du liquide, au commencement et à la fin du temps $t$. Deux observations donnaient une valeur de $a$, et l'identité de ces valeurs déduites de différentes observations combinées deux à deux, si cette identité existait, établissait l'exactitude de la loi supposée.

Voici les résultats obtenus au moyen d'une plaque de cuivre rouge de $0^m,011$ d'épaisseur :

| TEMPÉRATURES successives du liquide. | ÉPOQUES des observations. | EXCÈS de la température de la vapeur sur celle du liquide. | TEMPS ÉCOULÉ entre deux observations consécutives. |
|---|---|---|---|
| 24°,59 | 7′ | 75°,41 | |
| 30,74 | 8,49″ | 69,26 | 121″ |
| 36,89 | 10,55 | 63,15 | 135 |
| 43,03 | 13, 5 | 56,97 | 140 |
| 49,18 | 15,34 | 50,82 | 146 |
| 55,33 | 18,25 | 44,67 | 167 |
| 61,48 | 21,58 | 30,52 | 196 |
| 67,63 | 25,55 | 32,36 | 233 |

En déterminant la valeur de $a$ au moyen de deux observations extrêmes, on trouve $a = 0{,}000744$.

Les valeurs de $a$ déduites de deux observations consécutives, sont: 0,00077; 0,00073; 0,00078; 0,00075; 0,00070 et 0,00073, dont la moyenne est 0,000752.

Les chiffres significatifs des valeurs de $a$ déduites de deux observations prises dans la série en en sautant une, sont: 75, 77, 72, 76, 75, 72, dont la moyenne est 74,5. Les mêmes chiffres déduits de la série des observations en en sautant successivement 2, 3, 4 et 5, sont: 76, 73, 72, 76, 76, 75, 74, 73; 76, 74, 74; 74, 74, dont les moyennes sont 74,5; 74,4; 74,5; 74.

Les valeurs de $a$ diffèrent peu les unes des autres, et les petites différences qu'on y rencontre ne suivent aucune marche régulière, et doivent être attribuées aux erreurs inévitables dans des expériences de cette nature; mais elles résultent principalement d'une circonstance que nous indiquerons plus loin.

Des expériences analogues faites avec des plaques de cuivre plus minces, et avec des plaques de plomb, de zinc, d'étain, de fer et de fonte de différentes épaisseurs, ont donné des résultats analogues.

La première loi de la transmission se trouve ainsi vérifiée, du moins pour les métaux sur lesquels j'ai opéré, et dans les limites de température des observations.

701. En comparant les valeurs de $a$ relatives à des plaques d'un même

métal, mais d'épaisseurs différentes, je fus très-étonné de les trouver sensiblement les mêmes, quoique pour plusieurs métaux les épaisseurs eussent varié de 1 à 20 millimètres, et je doutai de l'exactitude de la loi relative aux épaisseurs. Mais, dans toutes ces expériences, j'avais remarqué une influence très-sensible de la vitesse de rotation de l'agitateur : la valeur de $a$ augmentait ou diminuait notablement avec cette vitesse, de sorte que la valeur de $a$, dans une même expérience, ne restait constante qu'à la condition de produire une agitation à peu près uniforme. En considérant en outre que la vapeur, en se condensant, devait couvrir la surface inférieure de la plaque d'une couche d'eau presque stagnante, il n'était pas douteux que, dans ces expériences, la surface de la plaque en contact avec la vapeur n'était pas à 100°, ni l'autre à la température indiquée par le thermomètre, et que la chaleur traversait réellement une lame métallique comprise entre deux lames d'eau, dont l'une était sensiblement immobile, et l'autre ne se renouvelait que lentement; alors, comme la conductibilité de l'eau est très-petite relativement à celle des métaux, l'influence de la conductibilité du métal disparaissait.

Pour vérifier cette conjecture, j'ai supprimé le chauffage à vapeur, j'ai rempli le vase d'eau à 0°, et j'ai plongé la plaque qui le fermait inférieurement, de 1 à 2 millimètres dans un grand vase rempli d'eau à la température ordinaire; j'ai terminé l'agitateur intérieur par des bandes de toile de crin qui, dans le mouvement, rasaient la surface de la plaque; et l'eau qui mouillait la surface extérieure était renouvelée au moyen d'un ruban de fil tendu verticalement dans un cadre auquel on donnait un mouvement rapide de va-et-vient. Par cette disposition, l'échauffement de l'eau du vase était très-lent, et le liquide qui mouillait les surfaces de la plaque pouvait être renouvelé rapidement. Les coefficients de transmission obtenus avec le nouvel appareil, pour des plaques de plomb de $0^m,001$; $0^m,0025$; $0^m,006$; $0^m,0095$; $0^m,015$ et $0^m,025$, ont été 0,00060; 0,00054; 0,00049; 0,00047; 0,00037; 0,00025. On voit, à l'inspection de ces chiffres, que l'influence des épaisseurs se manifeste d'une manière évidente. Des expériences faites avec des plaques de fer, d'étain, de zinc, de cuivre, ont donné des résultats analogues; mais l'accroissement de conductibilité par la diminution d'épaisseur était d'autant plus faible que les lames étaient plus minces et le métal plus conducteur.

Je devais penser, d'après cela, qu'en augmentant beaucoup la vitesse de renouvellement des liquides qui baignent les deux faces des plaques, et en employant des plaques épaisses des métaux les moins conducteurs, on arriverait à des coefficients qui seraient dans le rapport inverse des épaisseurs.

702. Je disposai pour cela un nouvel appareil dans lequel l'agitateur intérieur était mis en mouvement par un système d'engrenage, et l'agitateur extérieur consistait en une roue horizontale excentrique au vase, également mise en mouvement par un engrenage, et dont les rayons étaient formés par des tresses fortement tendues, qui, dans le mouvement de rotation, frottaient contre la surface extérieure de la plaque.

La figure 11 (pl. 14) représente une coupe verticale de ce dernier appareil, la figure 12 une projection horizontale, et la figure 13 une coupe à plus grande échelle de la partie inférieure du vase. ABCD est un vase en fer-blanc fermé inférieurement par la plaque métallique EF, dont la figure 13 indique le mode d'ajustement. Ce vase renferme un tube en cuivre qui porte des palettes placées à différentes hauteurs et à la partie inférieure des toiles de crin; le tube est guidé dans son mouvement par deux anneaux qui l'enveloppent et qui sont fixés dans leurs positions par les tiges IK et MN, et il est terminé supérieurement par une petite roue dentée. Le vase est fermé par un couvercle dont les bords sont mastiqués, et à travers lequel passe le tube qui porte les ailes destinées à agiter le liquide; ce couvercle porte un anneau O, suspendu à 1 centimètre au-dessus du tuyau, dans lequel on place un bouchon percé, à travers lequel passe la tige du thermomètre dont le réservoir se trouve à peu près au milieu du vase, et qui reste fixe pendant le mouvement des agitateurs. A'B'C'D' est un second vase qui enveloppe le premier auquel il est fixé par trois tiges de verre Y, Y, Y; il est rempli de coton cardé, et garni de trois pieds à vis M', M', M', qui se placent sur les supports N', N', soudés au vase inférieur PQ; le vase A'B'C'D' supporte la roue dentée à manivelle qui engrène dans le pignon du tube central. Enfin le vase PQ renferme une roue horizontale RS dont les ailes en tresse frottent dans leur mouvement la surface inférieure de la plaque EF; cette roue est mise en mouvement par le pignon T, la roue dentée UV et la manivelle X, dont l'axe traverse la boîte à étoupes Z.

Au moyen de cet appareil j'ai pu renouveler 1600 fois par minute le

liquide en contact avec les faces de la plaque métallique. En plaçant dans le vase ouvert de l'eau à peu près à 24°, et dans le vase intérieur de l'eau à la température ordinaire, et en employant des plaques de plomb, l'une de $0^m,020$, l'autre de 0,015 d'épaisseur, dans les mêmes circonstances, la durée du même réchauffement du vase intérieur a été de 500″ pour la première plaque et de 380″ pour la seconde; ce dernier chiffre ne diffère que de 5″ des trois quarts du premier. Ainsi l'on peut considérer la loi des épaisseurs comme vérifiée directement.

Dans ces expériences, la température moyenne du bain extérieur a été de 24°,04, et n'a différé des températures extrêmes que d'une petite fraction de degré, et les excès de températures au commencement et à la fin des expériences étaient 8°,91 et 9,55. Alors le coefficient de réchauffement pour la plaque de $0^m,020$ d'épaisseur était 0,000294; le poids de l'eau renfermée dans le vase, augmenté du poids du vase multiplié par sa capacité calorifique, étant de $3^k,287$, la quantité de chaleur qui serait transmise à travers la plaque pour une différence de température de 1°, serait égale à

$$0{,}000294 \times 3{,}287 = 0{,}000966;$$

et comme la plaque avait $0^m,005026$ de surface, la quantité d'unités de chaleur qui serait transmise dans les mêmes circonstances à travers 1 mètre carré, serait égale à

$$0{,}000966 \times \frac{1}{0{,}005026} = 0{,}191,$$

et pour une plaque de $0^m,001$ d'épaisseur, elle serait

$$0{,}192 \times 20 = 3{,}84.$$

703. Alors, en admettant les rapports de conductibilité des métaux trouvés par M. Despretz, on obtient les nombres suivants pour les quantités de chaleur qui seraient transmises dans 1″ à travers des plaques de 1 mètre carré de surface, de 1 millimètre d'épaisseur, et dont les surfaces seraient maintenues à des températures constantes qui différeraient de 1°.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Or.... | 21,28 | Fer.... | 7,95 | Marbre.... | 0,48 |
| Platine. | 20,95 | Zinc... | 7,74 | Porcelaine.. | 0,24 |
| Argent. | 20,71 | Plomb.. | 3,84 | Terre cuite. | 0,23 |
| Cuivre. | 19,11 | | | | |

D'après d'anciennes expériences de Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface, de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, en contact d'un côté avec de la vapeur à 100°, et de l'autre avec de l'eau à 28°, condense par heure 100$^k$ de vapeur, ce qui fait 15 unités de chaleur par seconde pour une différence de température de 72°, et 0,23 pour une différence de 1°.

D'après des expériences récentes de MM. Thomas et Laurens, dans lesquelles le cuivre était disposé en un seul tuyau d'un petit diamètre, on a évaporé 400$^k$ d'eau par heure et par mètre carré pour une différence de température de 45°, ce qui fait 1,22 unité de chaleur par seconde et pour une différence de température de 1°. Le chiffre obtenu par MM. Thomas et Laurens est plus élevé que celui de Clément, parce que la surface de transmission ayant la forme d'un tuyau d'un petit diamètre, l'air était complétement expulsé, circonstance qui augmente beaucoup la quantité de vapeur condensée.

On voit que dans les circonstances même les plus favorables, le chiffre obtenu pour la transmission de la chaleur à travers le cuivre, quand on ne renouvelle pas le liquide qui mouille les surfaces, est beaucoup plus petit que celui qui résulte des expériences que nous avons rapportées, à cause de la couche d'eau sensiblement immobile qui recouvre au moins une des surfaces.

704. Ainsi, quoique les lois de la transmission de la chaleur à travers les plaques, admises par les physiciens, soient exactes, ces lois ne sont point applicables à la transmission de la chaleur d'un liquide à un autre à travers une plaque métallique; et on peut admettre que, dans les limites d'épaisseurs généralement employées, la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence sensible. Mais si, dans certains cas, il y avait un grand avantage à augmenter cette transmission, même en dépensant du travail, on y parviendrait par une agitation qui renouvellerait très-rapidement les couches liquides en contact avec les surfaces des plaques.

Tout ce qui précède suppose que les deux surfaces des plaques sont en contact avec des liquides, et par conséquent ne doit être appliqué qu'au chauffage des liquides par des liquides, ou par la vapeur; car la vapeur, en se condensant contre les surfaces des plaques, les mouille, et tout se passe comme si le chauffage avait lieu par un liquide. Mais

quand les liquides sont chauffés par des gaz, et quand les gaz sont chauffés par d'autres gaz, en est-il encore ainsi? C'est ce que nous allons examiner.

705. Parlons d'abord du chauffage des liquides par les gaz : c'est, par exemple, le cas des chaudières à vapeur, du moins pour la partie des chaudières qui ne reçoit pas le rayonnement du foyer. Je n'ai point fait d'expériences directes à ce sujet; mais les résultats de la pratique ne permettent pas de douter que, si la nature et l'épaisseur du métal ont une influence, elle est très-petite; car on a reconnu depuis longtemps que les chaudières de fonte, de cuivre et de tôle de mêmes dimensions, mais dans lesquelles le métal a des épaisseurs très-variables, donnent sensiblement les mêmes produits dans les mêmes circonstances; c'est un fait sur lequel tous les ingénieurs sont d'accord. On peut d'ailleurs facilement s'en rendre compte. Lorsque l'épaisseur du métal augmente ou que sa conductibilité diminue, la température de sa surface extérieure augmente; c'est un fait bien constaté, car dans les chaudières de fonte, la surface extérieure rougit souvent, et, quant aux chaudières de fer, l'altération qu'elles éprouvent par l'action de la chaleur augmente avec leur épaisseur; mais comme la quantité de chaleur qui se transmet augmente avec la température de la surface extérieure, on conçoit que l'influence de la nature et de l'épaisseur du métal doit être très-faible.

706. Quant à la transmission de la chaleur d'un gaz à un autre à travers une plaque métallique, comme à volume égal les gaz ont une chaleur spécifique beaucoup plus petite que les liquides, et que leur conductibilité est très-faible, on peut regarder l'influence de la nature et de l'épaisseur de la plaque comme étant absolument nulle, attendu que la quantité de chaleur qui peut traverser la plaque, même dans les cas les plus défavorables, est incomparablement plus grande que celle qui la traverse réellement, et par conséquent, dans aucun cas, l'épaisseur du métal ne peut ralentir la transmission. La quantité de chaleur qui traverse la plaque est uniquement déterminée par la différence de température des deux gaz, les pouvoirs absorbants et émissifs des deux surfaces de la plaque, et surtout par les mouvements des lames d'air qui sont en contact avec les surfaces de la plaque métallique.

Ainsi on voit que, dans tous les cas, le renouvellement rapide des couches de liquide ou de gaz qui touchent les surfaces de la plaque mé-

tallique a une très-grande influence sur la transmission de la chaleur, mais que cette circonstance est beaucoup plus importante pour les gaz que pour les liquides.

707. On doit donc chercher la disposition des appareils qui favorise le plus possible ce renouvellement, par l'effet seul du mouvement qui résulte de l'échauffement et du refroidissement, et par les mouvements que les fluides doivent prendre pour entrer et sortir des appareils. Mais, pour les gaz, on peut en outre produire artificiellement dans leurs masses des mouvements qui occasionnent un renouvellement rapide des couches en contact avec les surfaces métalliques, soit par une action directe qui n'exigerait qu'un faible travail, soit en employant une partie de la force qui résulte de l'écoulement.

708. Considérons, par exemple, de l'air brûlé à une haute température, s'écoulant dans un canal cylindrique horizontal, environné d'eau qu'il doive échauffer. Les couches d'air qui sont en contact avec le métal se refroidissent très-rapidement; mais toutes les petites veines élémentaires n'ayant qu'une vitesse parallèle à l'axe du canal, les couches changeront de place très-lentement, car la seule cause du changement réside dans l'accroissement de densité qui résulte du refroidissement, et elle n'existe que pour la moitié supérieure du canal, et elle ne tend à produire le déplacement qu'avec une faible vitesse. Il en serait évidemment de même pour toute autre direction du canal. On conçoit, d'après cela, que si la section du canal est très-grande, ainsi que la vitesse de l'air brûlé à sa sortie, la plus grande partie des veines centrales n'auront pas été amenées en contact avec l'enveloppe, et qu'elles auront conservé leur température primitive. Mais si on plaçait dans le canal des roues à palettes montées sur le même axe, et mises en mouvement par un moteur quelconque, les veines centrales seraient jetées à la surface intérieure du cylindre, et on obtiendrait ainsi un bien plus grand refroidissement du gaz. Le mouvement du gaz du centre à la circonférence pourrait même être produit par le mouvement de translation du gaz lui-même; il suffirait, pour cela, de placer dans le canal un certain nombre de roues à palettes inclinées sur l'axe comme les ailes des moulins à vent; ces appareils, auxquels le mouvement de translation du gaz imprimerait une certaine vitesse de rotation, produiraient évidemment l'effet des roues à palettes dont les plans passent par l'axe de rotation.

709. On peut encore augmenter la transmission de la chaleur par un autre procédé qui n'a point été mis en pratique, mais qui, dans certains cas, pourrait être très-efficace. Nous avons vu que, dans la transmission de la chaleur à travers une plaque, il faut distinguer l'absorption par une des faces, l'émission par l'autre, et la conductibilité à travers l'épaisseur de la plaque; et nous avons vu que, dans les circonstances ordinaires, la quantité de chaleur que peut transmettre le métal est beaucoup plus grande que celle qu'il a réellement à transmettre. Il résulte de là que si, au lieu d'employer des plaques façonnées de différentes manières, on employait des plaques traversées par des barres plongeant jusqu'à une certaine profondeur dans les deux fluides liquides ou gazeux, dont l'un doit échauffer l'autre, en augmentant l'étendue des surfaces en contact avec les deux fluides, on augmenterait beaucoup l'effet produit, d'autant plus que les lames des fluides en contact avec les surfaces des barres seraient constamment renouvelées par le mouvement de translation des fluides. Considérons, par exemple, un canal horizontal parcouru par de l'air brûlé, et devant servir à chauffer de l'air que l'on fait mouvoir en sens contraire dans un canal enveloppant; si la surface du canal intérieur est traversée complétement par des barres métalliques qui se prolongent en dehors d'une certaine quantité, et si celles-ci ont des positions différentes, les parties intérieures des barres s'échaufferont dans toute leur étendue, et cette chaleur se dissipera par les surfaces extérieures; le courant d'air brûlé pourra être refroidi uniformément dans tous les points de sa section, et la chaleur sera transportée dans tous les points de la section de la veine d'air extérieur. Cette disposition peut être utile, surtout quand il est important d'effectuer la transmission dans un petit espace; mais elle a souvent des inconvénients, soit par la construction des appareils, soit par la difficulté de nettoyer les surfaces d'absorption ou d'émission.

# CHAPITRE IX.

## VAPORISATION.

710. La vaporisation des liquides comprend réellement quatre systèmes différents d'opération : 1° la formation de la vapeur qui doit être employée comme force motrice ou comme véhicule de la chaleur : nous conserverons à cette opération le nom de vaporisation ; 2° la production des vapeurs qui doivent être condensées et recueillies : cette opération porte le nom de distillation ; 3° la vaporisation qui a pour but de séparer, sans le recueillir, un liquide vaporisable mêlé avec un autre qui ne l'est pas ou qui l'est moins : cette dernière opération est désignée sous le nom d'évaporation ; 4° enfin, la formation des vapeurs, qui a pour but d'enlever un corps liquide qui mouille un corps solide : cette dernière opération porte le nom de séchage. Dans ce chapitre, nous ne nous occuperons que de la vaporisation proprement dite.

711. Les générateurs de vapeur sont très-compliqués et renferment un grand nombre de parties que nous examinerons successivement ; mais avant, nous décrirons sommairement deux appareils complets, choisis parmi ceux qui sont le plus généralement employés.

Les figures 1 et 3 (pl. 15) représentent en coupe une chaudière à vapeur à basse pression, dont on voit le plan figure 2. A, est le cendrier. B, le foyer. C, C, les carneaux dans lesquels circule la fumée. R, le registre qui établit la communication des carneaux avec le canal D, qui reçoit la fumée de tous les foyers des chaudières, pour la conduire à la cheminée générale. F, est un espace vide qui diminue la masse de la maçonnerie, et qui doit être complétement fermé pour s'opposer au refroidissement de la chaudière. MM, représente le tuyau général qui reçoit

la vapeur produite par chaque chaudière, et la conduit au tuyau L par lequel elle se rend à la machine à vapeur ou dans le lieu où elle doit être utilisée. NN est le mur qui sépare l'appentis, où se trouvent les chaudières, des ateliers. Le générateur GG est de la forme des chaudières de Watt; cette forme est favorable à la circulation de la fumée, elle est souvent employée pour les générateurs de vapeur à basse pression. *aa* représente le niveau de l'eau dans la chaudière. *hh*, le tuyau d'alimentation qui aboutit à un petit réservoir *g*, dans lequel l'eau est maintenue à un niveau constant par le tube *t t* qui fait communiquer entre eux tous les réservoirs d'alimentation. *n* est une soupape qui règle l'introduction de l'eau dans la chaudière, et qui s'abaisse ou s'élève suivant que le flotteur *i* monte ou descend. On voit que ce mode d'alimentation maintient entre de faibles limites le niveau de l'eau dans la chaudière. Un flotteur *d* est attaché à l'extrémité d'un petit balancier auquel est fixé, à l'autre extrémité, le poids qui le maintient en équilibre à la surface de l'eau. Une aiguille perpendiculaire, placée au milieu, indique par ses oscillations l'élévation ou l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. *bb* est un orifice par lequel on s'introduit dans la chaudière quand on veut la nettoyer ou la réparer, après avoir fait écouler toute l'eau qu'elle contient au moyen du robinet *q*. *c*, est une soupape qui sert à la rentrée de l'air dans le générateur, quand la pression intérieure s'abaisse au-dessous de celle de l'atmosphère. *k* est la soupape de sûreté; un poids, par la position variable qu'il peut prendre sur le levier *y*, règle la pression qui pourra la soulever et donner issue à la vapeur. *v* est la plaque fusible qui empêche la température de dépasser celle de la fusion de l'alliage dont elle est formée. *m*, prise de vapeur communiquant avec le tuyau *l* qui conduit la vapeur au tuyau général M M; une soupape *s* sert à fermer cette communication quand la chaudière ne marche pas. Une autre soupape *s'* sert au dégagement de l'excès de vapeur qui se rend par le tuyau *u* dans la cheminée, afin de ne pas se répandre dans la pièce. *r,r* sont des boîtes à étoupes dans lesquelles passent les tiges des flotteurs et des soupapes. *p* est le poids qui sert à équilibrer en partie le registre.

712. Une chaudière à vapeur à haute pression, pour être plus résistante, est toujours formée d'un ou de plusieurs cylindres, terminés par des calottes sphériques. La figure 4 (pl. 15) représente la coupe longitudi-

nale d'un générateur de vapeur à haute pression; la figure 6 en est la coupe transversale, et la figure 5 est la vue de face du fourneau.

GG est la chaudière à vapeur proprement dite; G', G' sont deux *bouilleurs,* communiquant par des *cuissards g,g* avec la chaudière. Ces bouilleurs servent à préserver le générateur du coup de feu; ils prolongent sa durée, mais comme ils reçoivent seuls le rayonnement du foyer, ils sont plus tôt mis hors de service, et il faut les remplacer assez souvent. C'est pour opérer ce changement avec facilité et sans défaire tout le fourneau, qu'on a construit une voûte au-dessus des bouilleurs. Les dépôts se réunissent presque tous dans les bouilleurs : c'est pour que le nettoyage en soit facile que ceux-ci se prolongent au delà du fourneau, et qu'ils sont fermés par des tampons en fonte, qu'on enlève facilement. Des supports *q,q* soutiennent l'extrémité des bouilleurs. *aa* est le niveau de l'eau dans la chaudière; il est indiqué au moyen du flotteur *d* qui, en s'élevant ou en s'abaissant, fait mouvoir l'aiguille indicatrice. *bb*, *trou d'homme*. *hh*, tube d'alimentation; il communique avec la pompe d'alimentation. *vv*, plaques fusibles. *kk*, soupapes de sûreté. *m*, prise de vapeur. *l*, tuyau par lequel la vapeur se dégage. La soupape *s* établit ou intercepte la communication de la chaudière avec le tuyau *l* commun à plusieurs chaudières. Un poids placé à l'une ou à l'autre des extrémités du levier, ouvre ou ferme la soupape.

A est le cendrier, B le foyer, CC les carneaux de circulation de la fumée, R le registre qui établit ou intercepte la communication avec la cheminée E; F est un espace vide et fermé qui s'oppose au refroidissement et diminue la masse de la maçonnerie. O est une ouverture qui sert à faire tomber la suie et les matières solides entraînées par le courant d'air chaud. P,P', sont des ouvertures fermées par des briques et qui servent au nettoyage des carneaux.

### § 1. — DES CHAUDIÈRES.

713. Dans l'établissement d'une chaudière quatre choses sont à déterminer : la nature du métal, la forme de la chaudière, sa grandeur et l'épaisseur du métal.

*Choix du métal.*

714. Les métaux que l'on peut employer dans la construction des chaudières à vapeur d'une grande dimension, sont très-peu nombreux : ce sont la tôle de fer, la fonte, le cuivre, le laiton, l'étain, le zinc et le plomb. Mais le plomb et l'étain sont trop mous et trop fusibles, et le zinc et le laiton sont trop altérables. Le fer, la fonte et le cuivre étant à la fois peu altérables et d'une grande ténacité, sont seuls employés.

715. Pour reconnaître lequel de ces trois métaux doit être préféré, il faut examiner 1° la facilité plus ou moins grande avec laquelle on peut fabriquer les chaudières en employant ces différents métaux ; 2° les moyens de réparation ; 3° leur prix ; 4° la valeur de la matière lorsque les chaudières sont hors de service ; et 5° enfin, leur durée.

716. Les chaudières de tôle et de cuivre se fabriquent avec des lames d'une étendue plus ou moins grande, que l'on emboutit, et que l'on réunit par une clouure serrée. Ces opérations s'exécutent avec plus de facilité sur le cuivre que sur le fer ; le cuivre peut même recevoir des formes qu'il serait impossible de donner à la tôle, du moins sans courir la chance d'en altérer la ténacité ; en outre, les lames de cuivre peuvent être réunies par une soudure forte, opération qui ne pourrait s'exécuter sur la tôle qu'avec de grandes difficultés. Ainsi, sous le rapport de la facilité de la fabrication, le cuivre a beaucoup d'avantages sur le fer.

Quant aux chaudières de fonte, elles reçoivent immédiatement, dans la coulée, la forme qu'elles doivent conserver, et dans l'état actuel de l'art du fondeur, toutes les formes de chaudières peuvent s'exécuter avec une égale facilité. Toute la difficulté de l'établissement des chaudières de fonte réside dans la réunion des différentes parties qui composent la chaudière. Les jonctions se font ordinairement par des collets qui s'appliquent les uns sur les autres, et que l'on tient serrés par des écrous ; les joints se bouchent avec du mastic de fonte, dont nous indiquerons plus tard la composition.

717. Les chaudières de tôle et de cuivre se réparent facilement par l'application de plaques maintenues par des rivets. Les chaudières de fonte peuvent aussi être réparées par des plaques de tôle, maintenues par des écrous et garnies de mastic de fonte.

718. Quant à la dépense d'une chaudière construite avec ces différents matériaux, ce n'est que dans chaque cas particulier qu'on peut la déterminer d'une manière absolue; mais, les rapports des dépenses de trois chaudières semblables, construites l'une en fonte, l'autre en tôle, et la dernière en cuivre, doivent rester sensiblement les mêmes, quelles que soient la forme et la grandeur des chaudières, et ces rapports sont faciles à calculer. En effet, les surfaces extérieures des trois chaudières étant égales, les poids des métaux seront entre eux comme les densités multipliées par les épaisseurs. Or, la densité de la tôle = 7,78, celle de la fonte = 7,29, et celle du cuivre = 8,87 ; les épaisseurs correspondantes que l'on donne ordinairement à la fonte, au fer, au cuivre, pour résister à la même pression, sont entre elles comme les nombres 12, 2 et 3. Par conséquent, le poids relatif de la chaudière de fonte sera..... $12 \times 7{,}29 = 87$

Le poids relatif de la chaudière de tôle sera..... $2 \times 7{,}78 = 16$

Le poids relatif de la chaudière de cuivre sera..... $3 \times 8{,}87 = 26$.

Les deux derniers nombres devraient être un peu augmentés à cause des clouures, où le métal a une plus grande épaisseur : mais cette augmentation est à peu près compensée dans les chaudières de fonte par les collets d'ajustage. Maintenant, pour avoir la valeur relative de chaque chaudière, il suffit de multiplier son poids par le prix du métal façonné en chaudière.

Or, la fonte vaut maintenant à Paris 45 francs les 100 kilogrammes, la tôle 140 francs, et le cuivre 400 francs; par conséquent, les prix relatifs de trois chaudières de même surface seront :

pour la fonte... $87 \times 45 = 3915$..... $= 1$,

pour la tôle.... $16 \times 140 = 2240$..... $= 0{,}57$;

pour le cuivre.. $26{,}6 \times 400 = 10640$..... $= 2{,}72$.

Ainsi, les chaudières qui coûtent le moins d'établissement sont celles en tôle. Les prix des chaudières de fonte et de cuivre relativement à celles de fer sont 1,74 et 4,75.

719. Quant aux valeurs des chaudières, lorsqu'elles sont hors de service, nous pouvons les calculer en admettant que le vieux cuivre se vende 250 francs les 100 kilogrammes, la vieille tôle 24 francs, et la vieille fonte 12 francs; par conséquent le rapport du prix de la chaudière neuve à celui de la chaudière hors de service, est pour la chaudière

de fonte..... 4 : 1;
pour la chaudière de tôle..... 6 : 1;
pour la chaudière de cuivre..... 1,6 : 1.

720. Enfin, pour juger en définitive quelles sont les chaudières les plus avantageuses, il faudrait connaître leur durée moyenne; mais la durée d'une chaudière dépend tellement de la qualité de la matière et des circonstances dans lesquelles elle se trouve, qu'on ne peut rien dire à cet égard. Il est cependant hors de doute, que toutes choses égales d'ailleurs, les chaudières de cuivre ont une plus grande durée que les autres. Si on admettait dix ans pour la durée moyenne d'une chaudière en tôle et pour une chaudière de fonte, et vingt pour celle d'une chaudière de cuivre, en comptant l'intérêt à 6 pour cent; après dix ans, une chaudière de fonte aurait coûté

$$1 + 10 \times 0{,}06 - \frac{12}{45} = 1{,}34.$$

Après le même temps, une chaudière de tôle aurait coûté

$$0{,}57 + 10 \times 0{,}06 \times 0{,}57 - \frac{24}{140}\, 0{,}57 = 0{,}81;$$

et après le même temps, une chaudière de cuivre aurait coûté

$$\frac{2{,}72 + 20 \times 0{,}06 \times 2{,}72 - \frac{250}{400}\, 2{,}72}{2} = 2{,}14.$$

Ainsi, par les seules considérations du prix d'achat, de l'intérêt du capital et du prix de la matière quand la chaudière est hors de service, les chaudières de tôle devraient être préférées à celles de fonte et de cuivre.

Mais d'autres considérations se joignent encore à celles-là, pour exclure les chaudières de fonte et de cuivre. Les chaudières, et surtout les bouilleurs de fonte, sont sujets à se casser par les variations brusques de température, et ils éclatent souvent sans causes extérieures, probablement par un travail intérieur de la matière, dont on ne connaît pas la nature. Les chaudières de cuivre coûtent à peu près trois fois plus que les chaudières de tôle, et cette dépense de premier établissement seule, doit leur faire préférer les chaudières de tôle, car dans les établissements industriels, la durée est une circonstance à laquelle on ne doit pas attacher trop d'importance, maintenant que les

découvertes se succèdent avec trop de rapidité pour qu'on puisse compter sur un long usage des appareils.

*Forme des chaudières.*

721. La forme des chaudières n'a qu'une bien faible influence sur la quantité de chaleur qu'elles peuvent transmettre, et, par conséquent, sur la quantité de vapeur qu'elles peuvent produire. Ainsi, sous ce rapport, la forme des chaudières est à peu près arbitraire. Mais il est une autre condition qui restreint beaucoup le nombre des formes qu'on peut donner aux chaudières, c'est la résistance aux forces qui tendent à les déformer ou à les déchirer. Ces forces sont au nombre de trois : le poids du métal lui-même, le poids du liquide renfermé dans la chaudière, et enfin la force élastique de la vapeur. En général, les deux premières forces ont une si faible influence, relativement à la dernière, qu'on n'y a jamais égard, d'autant plus que les épaisseurs des feuilles métalliques qu'on emploie dans la construction des chaudières, sont toujours de beaucoup supérieures à celles qui correspondraient à leur déformation par le poids du métal et celui du liquide qu'elles doivent renfermer.

La forme de chaudière la plus avantageuse, sous le rapport de la résistance, est évidemment celle d'un cylindre à base circulaire, car elle ne peut pas changer.

722. Lorsque les chaudières doivent produire de la vapeur sous une pression peu supérieure à celle de l'atmosphère, qu'elles sont à *basse pression,* on peut leur donner des formes quelconques, pourvu qu'on maintienne par des armatures convenablement placées et d'une résistance suffisante, les parties que la pression tend à écarter. Mais les dispositions le plus généralement employées consistent en un cylindre unique placé horizontalement, dont la base est tantôt circulaire, tantôt formée d'un demi-cercle, de deux parties latérales rectilignes ou concaves, et d'une partie inférieure aussi droite ou concave; la fumée parcourt successivement la partie inférieure et les parties latérales. Quelquefois aussi les chaudières sont traversées, dans le sens de leur longueur, par un ou plusieurs tuyaux à fumée. Souvent aussi le foyer est placé dans l'intérieur même de la chaudière.

Quand la vapeur doit être à haute pression, on emploie toujours des chaudières cylindriques, à foyers extérieurs, et souvent on place au-dessous deux ou trois cylindres d'un plus petit diamètre qui communiquent avec la chaudière par un ou deux tubes d'un diamètre peu différent; ces cylindres portent le nom de *tubes bouilleurs*, ils reçoivent seuls le rayonnement du foyer, et c'est sur eux que se porte toute l'action destructive de la chaleur. Enfin, dans les bateaux à vapeur et dans les locomotives, on emploie des dispositions particulières exigées par les circonstances dans lesquelles ces machines doivent fonctionner.

Nous examinerons plus tard les avantages et les inconvénients que présentent ces différentes formes de chaudières. Maintenant nous nous contenterons de décrire les chaudières à basse et à haute pression le plus généralement employées.

723. *Chaudière de Watt.* Les figures 1re et 2 (pl. 16) représentent une coupe longitudinale et une coupe transversale d'une chaudière de Watt destinée à alimenter une machine de quarante chevaux. Les feuilles de tôle de $0^m,004$ d'épaisseur ont été percées à la machine et réunies par des clous rivés à chaud; les trous ont ordinairement $0^m,03$ de diamètre, et la distance des centres est de 0,06; aux deux bouts, les parties latérales et les fonds sont réunis sur une bande de fer percée de trous et qui est pliée à angle droit; les fonds sont rivés sur la face plane, et les parties cylindriques sur l'autre. Les figures 3 et 4 représentent deux élévations d'une des bandes de fer dont nous venons de parler, et qu'on désigne sous le nom de *cornière*. Les joints des feuilles de tôle sont ensuite mattés à froid.

Les flancs de la chaudière sont maintenus par des barres de fer *mn*, *pq*, dont les longueurs sont déterminées par des systèmes de clavettes dont on voit la disposition dans les figures 5, 6, 7; l'une représente une projection verticale, l'autre une coupe verticale, et la dernière une projection horizontale. Les deux fonds sont également retenus par des armatures qui ne sont pas représentées dans les dessins.

Au milieu de la chaudière se trouve une large tubulure désignée sous le nom de *trou d'homme*, et qui est destinée à permettre à un ouvrier de s'introduire dans la chaudière pour la nettoyer ou la réparer. Cette tubulure, tantôt circulaire, tantôt elliptique, est ordinairement en fonte; elle se ferme par une plaque de même métal que l'on serre avec des

boulons dont la tête s'introduit au-dessous du collet de la tubulure (fig. 10), ou dont la tête a été noyée dans la fonte lors de la fusion (fig. 8); dans tous les cas, on place sur le bord de la tubulure un carton dont les deux faces sont recouvertes de mastic rouge (pâte de minium et d'huile de lin lithargirée), afin de rendre le joint parfaitement étanche. Quelquefois, pour éviter toute chance de fuite par l'accroissement de pression, l'ouverture elliptique de la tubulure a un rebord plat intérieur de 2 à 3 centimètres, au-dessous duquel on introduit le couvercle en présentant son petit diamètre au plus grand diamètre de l'orifice; on le maintient en place d'une manière quelconque, et c'est la pression de la vapeur qui, en le comprimant, s'oppose d'autant plus à la fuite de la vapeur que sa tension est plus grande.

Les figures 12 et 13 représentent l'élévation et la coupe du robinet de vidange; ce robinet se place en un des points les plus bas de la chaudière, et ordinairement sur la face qui se trouve du côté du foyer.

La soupape qui est placée au centre de la plaque qui ferme le trou d'homme (fig. 10), s'ouvre de dehors en dedans; elle est destinée à s'opposer à l'écrasement de la chaudière par la pression de l'atmosphère, par suite d'un abaissement de la tension de la vapeur. Lorsque, par le refroidissement ou par une injection trop considérable d'eau d'alimentation, la tension de la vapeur s'abaisse au-dessous de celle de l'atmosphère, l'air rentre dans la chaudière et y rétablit la pression atmosphérique. La soupape dont il est question porte le nom de *reniflard*.

Pour ces chaudières, le foyer est placé au-dessous et à l'un des bouts; la fumée en parcourt toute la longueur; elle revient en avant par un canal dont un des flancs forme une des parois, et elle retourne à la cheminée par un canal qui parcourt l'autre flanc, en passant sur le fond qui se trouve en avant.

724. *Chaudière à haute pression à bouilleurs.* Les figures 1re et 2 (pl. 17) représentent une coupe verticale et une élévation d'une chaudière à deux bouilleurs, destinée à une machine de huit chevaux. Les figures 5 et 6 représentent à une échelle double une coupe de la tête d'un des bouilleurs et le mode de fermeture. Quand le diamètre des bouilleurs excède $0^m,45$, on les ferme par des plaques elliptiques; mais quand le diamètre est plus petit, on les ferme par des plaques retenues par des croisillons en fer, maintenus par des écrous, afin de ne pas diminuer l'orifice d'ac-

cès dans les bouilleurs. Les figures 7 et 8 représentent à la même échelle le même mode de fermeture du trou d'homme; les tiges de fer *a* et *b* ont été prises dans la fonte du couvercle AB, lors de la fusion; ces tiges sont taraudées à leurs extrémités libres, et maintenues par des traverses *mn* et *pq* qui s'appuient sur les bords de l'ouverture.

725. Dans le mode de construction indiqué par les figures 1re et 2, les tuyaux de communication de la chaudière et des bouilleurs sont rivés sur ces deux pièces; mais comme les bouilleurs s'usent plus promptement que les chaudières, on a imaginé un mode d'assemblage qui permet de démonter facilement les bouilleurs sans déranger la chaudière. Il est indiqué dans la figure 9. *abcd* est une tubulure en fer, rivée sur un bouilleur; elle porte une douille en fonte, garnie d'un repos *eé*; cette douille pénètre dans une autre en tôle *ghg'h'* fixée à la chaudière; l'anneau *gg'* vient reposer sur l'anneau *eé*, et on remplit de mastic de fonte l'intervalle annulaire des deux pièces (1). Cet intervalle doit avoir de 12 à 15 millimètres de largeur, afin qu'on puisse facilement comprimer le mastic, et l'enlever avec un burin quand on veut séparer les bouilleurs de la chaudière.

Lorsqu'on adopte cette disposition pour réunir les chaudières aux bouilleurs, et que les chaudières sont à haute pression, il est prudent de fixer les bouilleurs aux chaudières au moyen d'une tige en fer qui passe dans les cuissards, et qui se termine par deux tiges de fer transversales qui s'appuient l'une contre le bouilleur, l'autre contre la chaudière. Cette disposition est indiquée dans la figure 4 (pl. 17).

726. Les figures 3 et 4 (pl. 17) représentent deux coupes d'une chaudière à bouilleurs en fonte. La chaudière est composée de deux parties réunies par des écrous et du mastic de fonte. Les bouilleurs sont fixés à la chaudière par le moyen que nous venons de décrire.

---

(1) Le mastic de fonte est formé d'un mélange de 25 à 30 parties de limaille de fonte non oxydée, d'une partie de sel ammoniac et d'une partie de fleur de soufre; on ajoute de l'eau et de l'urine, la matière s'échauffe et se durcit promptement. Pour l'usage dont il est question, on l'emploie presque sec, échauffé par l'action des éléments qui le composent, et on le comprime fortement à coups de marteau; il prend en peu de temps la dureté de la fonte. Lorsque ce mastic doit être comprimé par des écrous, on l'emploie en pâte molle.

Les bouilleurs en fonte sont entièrement abandonnés, parce qu'ils se cassent facilement par les changements de température : ils sont même proscrits par les règlements de police ; mais les chaudières en fonte avec bouilleurs en fer fonctionneraient sans présenter plus de chances d'accidents que les chaudières en fer.

727. Les chaudières sont ordinairement soutenues par quatre oreilles en fer assez prolongées pour porter sur la partie de la maçonnerie qui se trouve au delà de celle qui forme la voûte des carneaux, figures 12 (pl. 33), et 11 (pl. 34). D'autres fois les oreilles sont courtes et sont supportées par des chandeliers en fonte qui s'appuient sur le fond des carneaux. Quant aux bouilleurs, ils sont ordinairement supportés en avant par la plaque de la porte, et derrière par des chandeliers en fonte.

*Dimensions des chaudières.*

728. Dans tous les cas qui peuvent se présenter, la quantité de vapeur à produire dans une heure, est déterminée par l'effet qui doit être obtenu, et la quantité de combustible à brûler dans le même temps s'ensuit nécessairement ; en effet, le maximum de tirage des cheminées a lieu à environ 300°, et la température à laquelle 1 kilog. de houille élèverait les 18,44 mètres cubes d'air que nécessite sa combustion, si toute la chaleur développée était employée à cet effet, serait de $7500 : 18{,}44 \times 1{,}3 \times \frac{1}{4} = 1250°$, par conséquent les $\frac{3}{4}$ de la chaleur doivent être absorbés par la chaudière, et en multipliant par $\frac{4}{3}$ la quantité de combustible rigoureusement nécessaire à la production de la vapeur demandée, on aura celle qui doit être consommée. Mais pour que la chaudière absorbe la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation, il est important de lui donner des dimensions convenables.

Remarquons d'abord que la capacité de la chaudière est sans influence, car la chaleur ne pénètre dans l'eau qu'à travers sa surface.

La chaleur qui se produit dans le foyer se dissipe, comme nous l'avons dit, de deux manières différentes : par le rayonnement et par le courant d'air qui traverse constamment le combustible. Une partie de la chaudière s'échauffe et par le rayonnement et par le contact de l'air chaud, et une partie seulement par ce dernier mode. On conçoit facilement qu'à mesure que la chaudière est plus allongée, qu'elle accompagne la fumée dans une

plus grande étendue, la fumée se refroidit toujours davantage, et qu'il existe une longueur du circuit au delà de laquelle la fumée a seulement la température de 300° qui correspond au maximum de tirage.

Il est d'abord évident que chaque mètre carré de surface de chauffe absorbe une quantité de chaleur qui diminue très-rapidement depuis le foyer jusqu'à l'extrémité de la chaudière qui est abandonnée par la fumée, attendu que l'influence du rayonnement diminue avec l'inclinaison des rayons, et avec la distance; et que la température de la fumée décroît aussi très-rapidement à mesure qu'elle s'éloigne du foyer, par le fait même de l'absorption de la chaleur.

729. On a fait des expériences assez exactes pour déterminer la quantité de chaleur qui peut passer à travers un mètre carré de surface de différents métaux exposée au feu le plus ardent, et de la manière la plus avantageuse. D'après M. Christian, le maximum de vapeur que peut produire dans une heure 1 mètre carré de surface de chaudière de fonte exposée au feu le plus violent et entièrement plongée dans la flamme, est de 100 kilogrammes. M. Clément a obtenu le même nombre pour une chaudière de cuivre de 3 millimètres d'épaisseur placée dans les mêmes circonstances.

Il résulte de là, comme nous l'avons déjà dit (704), que la nature et l'épaisseur du métal sont sans influence sur la quantité de vapeur produite, et qu'on doit admettre que pour la partie de la chaudière qui se trouve immédiatement au-dessus du foyer, chaque mètre carré de surface fournit à peu près 100 kilogrammes de vapeur par heure.

Mais il est impossible de rien calculer pour ce qui se passe au delà: les phénomènes sont trop compliqués, et dépendent trop des circonstances particulières à chaque chaudière. Il faut alors s'en rapporter à des expériences qui donnent la quantité moyenne de vapeur fournie par chaque mètre carré de surface de chauffe, quand la fumée ne possède à sa sortie que la température convenable au tirage.

730. Or, il résulte de l'observation des chaudières bien établies, qui produisent de 6 à 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, et qui abandonnent la fumée à environ 300°, que la production moyenne de vapeur par heure et par mètre carré est comprise entre 15 et 20 kilogrammes.

Dans le traité des machines à vapeur de Farey, l'auteur donne les

règles suivantes, déduites de celles de Watt et de celles qui sont suivies par d'autres ingénieurs : $1^{m.c.},395$ à $1^{m.c.},674$ de surface de chauffe par cheval; en admettant 5 kilogrammes de houille par cheval et 5 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, cette règle revient à calculer la surface de chauffe, en supposant une production moyenne de 18 à 15 kilogrammes de vapeur par mètre carré de surface de chauffe.

Ce sont les nombres admis par les bons constructeurs, mais à la condition que la partie de la chaudière qui reçoit le rayonnement du foyer soit au moins la moitié de la surface de chauffe totale.

Il est important de remarquer que, si on prenait un nombre beaucoup plus grand pour la production moyenne, les chaudières seraient beaucoup plus petites, mais on n'utiliserait qu'une plus petite partie de la chaleur produite : on pourrait ne produire que 3 ou 4 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille. C'est ce qui arrive dans les chaudières de bateau, dans lesquelles la production de vapeur par mètre carré et par heure s'élève de 33 à 35 kilogrammes. Si, au contraire, on prenait un nombre beaucoup plus petit, les chaudières seraient trop grandes, la fumée trop refroidie à son entrée dans la cheminée, et par suite on obtiendrait un faible tirage qui pourrait occasionner plus de perte par la mauvaise combustion, que de profit par un plus grand refroidissement de la fumée, à moins cependant que les cheminées ne soient très-hautes et très-larges.

731. Connaissant, dans chaque cas particulier, la quantité de vapeur à produire dans une heure, et sachant que chaque mètre carré fournit moyennement 15 à 20 kilogrammes de vapeur, on trouvera facilement l'étendue de la surface de chauffe de la chaudière, et par suite toutes ses dimensions, quand on aura déterminé la forme qu'elle doit avoir.

Ordinairement on construit plusieurs chaudières à vapeur, presque toujours trois lorsque deux suffisent à l'effet qu'on veut produire, afin d'éviter le chômage qui aurait lieu pendant les réparations, si on n'employait qu'une seule chaudière. Dans ce cas, deux seulement sont constamment en activité. La vapeur est reçue dans un même tuyau par des tuyaux additionnels communiquant à chaque chaudière, et garnis de robinets ou de soupapes disposés convenablement.

*Épaisseur des chaudières.*

732. L'épaisseur que l'on doit donner aux chaudières dépend de la nature du métal que l'on emploie, de leur forme, de leur grandeur, et des pressions auxquelles elles seront soumises. Il est impossible de déterminer cette épaisseur pour les chaudières qui ne sont ni sphériques ni cylindriques à bases circulaires, parce que la pression intérieure tend d'abord à les déformer, et que la résistance qu'elles exercent varie avec leur forme, suivant des lois trop compliquées. Mais comme ces sortes de chaudières ne sont jamais employées que pour produire de la vapeur à basse pression, et qu'elles sont toujours garnies d'armatures intérieures qui s'opposent aux principales variations de dimensions que la pression intérieure tend à produire, l'épaisseur du métal n'a que peu d'influence.

733. Quant aux chaudières à haute pression, qui sont toujours cylindriques, on peut facilement déterminer l'épaisseur qu'elles doivent avoir pour résister à une pression donnée.

Lorsqu'une chaudière cylindrique à base circulaire est pressée intérieurement par la vapeur, en supposant que le métal soit homogène et ait partout la même épaisseur, elle ne peut se rompre que suivant deux génératrices opposées, ou suivant une section perpendiculaire à son axe, à cause de la symétrie du corps.

734. Cherchons d'abord la résistance à la rupture suivant deux génératrices. Le cylindre pouvant être considéré comme formé d'anneaux placés les uns à côté des autres, chacun, dans le cas que nous considérons, résistera isolément à la pression qui tend à l'ouvrir ; ainsi, la résistance d'un cylindre à une pression qui tend à le déchirer suivant une arête, est indépendante de sa longueur et égale à celle d'un des anneaux qui le composent.

Soit ABCD (fig. 14, pl. 16) un de ces anneaux ayant, par exemple, $0^m,001$ de largeur et une épaisseur $e$; il sera pressé intérieurement et dans la direction des rayons par la vapeur. Si on mène un diamètre quelconque AB, il est évident que les forces qui agissent au point A, dans les directions A$m$ et A$n$, et qui tendent à ouvrir l'anneau en ce point, se trouveront répétées au point B, de sorte que l'anneau tend également à se déchirer au point A et au point B. Les tractions qui se manifestent

aux points A et B, proviennent des pressions qui s'exercent sur les demi-cercles ACB et BDA, et la résultante de ces pressions est facile à trouver. Représentons par $p$ la pression de la vapeur en kilogrammes par millimètre carré; la pression exercée sur une partie très-petite $ss'$ de l'anneau sera $p \times ss'$, et sera dirigée suivant le rayon qui passe par le milieu de $ss'$. Décomposons cette force en deux autres, l'une parallèle, et l'autre perpendiculaire au diamètre AB; il est évident que la première sera sans influence sur la traction aux points A et B; la seconde s'obtiendra en multipliant $p \times ss'$ par le cosinus de l'angle formé par la ligne $ss'$, avec la ligne AB; ainsi la composante perpendiculaire à AB sera $p \times ss' \times \cos(ss', AB)$. Mais $ss' \cos(ss', AB)$ est égal à la projection $tt'$ de l'arc $ss'$ sur le diamètre AB; ainsi, la composante cherchée sera $p \times tt'$, et la somme totale des composantes sera $AB \times p$. Et comme cette résultante se partage en deux composantes égales appliquées aux points A et B, en chacun de ces points les tractions opposées seront représentées par $\frac{1}{2}$ de $AB \times p$, ou par $p$R, R étant le rayon de l'anneau.

Ainsi, en désignant par K la résistance à la rupture par traction d'une barre ayant 1 millimètre de section, à l'instant de la rupture de l'anneau on aura

$$Ke = p\mathrm{R}.$$

735. Examinons maintenant la résistance de la chaudière à la rupture suivant un anneau. Deux anneaux contigus tendent évidemment à se séparer en vertu des pressions exercées par la vapeur sur les deux fonds; or, d'après ce que nous avons dit précédemment, la pression exercée par la vapeur sur un élément quelconque d'un des bouts de la chaudière, pourra se décomposer en deux : l'une, perpendiculaire à l'axe qui sera sans influence sur la traction de deux anneaux contigus, et dont l'autre, parallèle à l'axe, aura pour valeur la pression sur l'unité de surface multipliée par la projection de l'élément sur un plan perpendiculaire à l'axe du cylindre; par conséquent, la somme totale de ces composantes sera égale à $p\pi\mathrm{R}^2$; et comme cette pression agit sur toutes les faces latérales des anneaux, on aura

$$2\pi\mathrm{R}e\mathrm{K} = p\pi\mathrm{R}^2; \quad \text{ou} \quad Ke = \frac{p\mathrm{R}}{2}.$$

Ainsi, la résistance d'une chaudière à la rupture suivant un anneau est deux fois plus grande que sa résistance à la rupture suivant deux

génératrices; par conséquent, c'est toujours suivant la direction des génératrices que la rupture aura lieu.

736. L'épaisseur $e$ qu'il faudrait donner à une chaudière pour qu'elle éclatât par une pression $p$ de la vapeur, serait alors donnée par l'équation $e = Rp : K$. En prenant pour unité le centimètre, et en désignant par $n$ le nombre d'atmosphères de la vapeur, comme la pression d'une atmosphère sur un centimètre carré est de $1^k,03$, et que la pression qui produit la rupture est celle qui correspond à $n-1$ atmosphères, on aurait :

$$e = \frac{R(n-1)1,03}{K}; \quad \text{ou} \quad e = \frac{R(n-1)}{K}.$$

737. La valeur de K a été déterminée pour les métaux généralement employés par différents physiciens. Le tableau suivant renferme les résultats obtenus.

*Tableau de la ténacité des différents métaux.*

| NATURE du métal. | OBSERVATEURS. | | POIDS supporté par 1 millimètre carré, à l'instant de la rupture. |
|---|---|---|---|
| | | | k |
| Fer forgé | Perronnet | moyenne | 42,9 |
| | Souflot et Rondelet | *id.* | 46,8 |
| | Poléni | *id.* | 44, |
| | Telford | *id.* | 46, |
| | Brown | *id.* | 39,1 |
| | moyenne | | 43,84 |
| Tôle | Navier, dans le sens du laminage | | 40,8 |
| | Navier, perpendiculairement au sens du laminage | | 37,4 |
| Fonte | Brown | moyenne | 14,2 |
| | Rennie | *id.* | 13,39 |
| | moyenne | | 13,70 |
| Métal de canon | Rennie | moyenne | 25,54 |
| Cuivre battu | *Id.* | *id.* | 24,86 |
| Cuivre laminé | Navier | *id.* | 21,1 |
| Cuivre fondu | Rennie | *id.* | 13,39 |
| Cuivre jaune fin | *Id.* | *id.* | 12,61 |
| Étain fondu | *Id.* | *id.* | 3,32 |
| Plomb fondu | *Id.* | *id.* | 1,27 |
| Plomb laminé | Navier | *id.* | 1,35 |

738. Navier a observé qu'en général le fer commence à s'allonger sensiblement sous des charges égales aux $\frac{2}{3}$ au moins de celles qui produisent la rupture. Le même effet a lieu pour le cuivre, sous des charges égales à la moitié de celles qui produisent la rupture, et avec le plomb pour des charges qui surpassent un peu cette moitié.

Ces trois substances présentent des modifications différentes lors de leur rupture par l'effet d'une tension. L'allongement du fer, avant la rupture, est assez irrégulier; il varie depuis $\frac{1}{90}$ jusqu'à $\frac{1}{10}$ environ de la longueur primitive. Le cuivre s'est allongé, avant de se rompre, des $\frac{2}{5}$ environ de la longueur primitive, la largeur et l'épaisseur diminuant en conséquence. Le plomb, sous les dernières charges que les pièces ont supportées, s'est allongé de $\frac{1}{70}$ environ de la longueur primitive; mais, sous des charges un peu plus grandes qui ont déterminé la rupture, on a vu les pièces s'allonger lentement et progressivement en diminuant de largeur et d'épaisseur; tandis que les autres substances rompent subitement et présentent une fracture transversale, le plomb rompt lentement en s'étirant, et les deux parties présentent, après leur séparation, une sorte de tranchant par l'effet de la diminution progressive de la largeur et de l'épaisseur, ce qui leur donne à peu près la forme de l'outil nommé *tourne-vis*.

739. Lorsqu'une chaudière cylindrique, fermée, est pressée intérieurement par la vapeur, le métal est tendu simultanément, et dans le sens de la longueur du cylindre, et dans une direction transversale. Les expériences sur la ténacité des métaux ayant été faites sans que les métaux fussent soumis à une traction latérale, il était important de vérifier si cette circonstance n'avait point d'influence sur la résistance qu'ils présentent. Navier a fait à ce sujet deux expériences décisives; cet ingénieur a fait construire deux vases sphériques en tôle, qui avaient $0^m,33$ et $0^m,28$ de diamètre, et $2\frac{2}{3}$ millimètres d'épaisseur : ces deux sphères ont été rompues au moyen d'une presse hydraulique, par des pressions de 144 et de 163 atmosphères. Il résulte de là que la résistance de la matière n'est point affaiblie par des tractions égales dirigées dans tous les sens, et qu'elle est la même que si elle n'était tendue que dans une seule direction. En effet, la tôle a été rompue par une tension égale dans tous les sens à environ 46 kil. par millimètre carré de section, nombre un peu plus grand que celui qui est donné par les expériences directes;

ce que l'on peut attribuer à ce que la sphère était consolidée par un cercle, où la tôle était doublée et soudée, et probablement aussi à ce que le fer était d'une très-bonne qualité.

En comparant la résistance du plomb donnée par le tableau précédent à celle qui résulte de quelques expériences faites à Édimbourg, par M. Jardine, sur des tuyaux cylindriques que ce physicien a fait crever sous des pressions qu'il a mesurées, Navier a trouvé la plus parfaite coïncidence.

740. En prenant 3000 kilog. pour la résistance du fer par centimètre carré, l'équation (1) devient

$$e = \frac{R(n-1)}{3000} = \frac{3{,}3R(n-1)}{10000}.$$

Mais, pour les chaudières à vapeur, l'épaisseur du métal doit être beaucoup plus grande, car la chaudière doit avoir un grand excès de résistance. La valeur de $e$ sera nécessairement de la forme

$$e = \frac{M.3{,}3R(n-1)+N}{10000},$$

attendu que pour $n=1$, l'épaisseur ne peut pas être nulle.

741. L'instruction annexée à la loi du 12 juillet 1828 contient la formule suivante qui donne l'épaisseur que doivent avoir les chaudières à vapeur.

$$e = \frac{36R(n-1)+3000}{10000}; \qquad (2)$$

expression qui donne la valeur de $e$ en centimètres, et dans laquelle le rayon R doit aussi être exprimé en centimètres.

Cette formule revient évidemment à donner à la chaudière une épaisseur de $0^m{,}003$, indépendamment de celle qui est exigée par la pression qu'elle doit supporter, et, en outre, une épaisseur dix fois plus grande que celle qui correspondrait à l'équilibre.

742. Le tableau suivant donne, d'après la loi, les épaisseurs des chaudières cylindriques de tôle et de cuivre, qui correspondent à des diamètres compris entre 50 et 100 centimètres, et pour des pressions qui varient de 2 à 8 atmosphères.

*Tableau des épaisseurs à donner aux chaudières de fer et de cuivre, d'après l'ordonnance du* 12 *juillet* 1828.

| DIAMÈTRES des chaudières | 2 ATMOSPHÈRES | 3 ATMOSPHÈRES | 4 ATMOSPHÈRES | 5 ATMOSPHÈRES | 6 ATMOSPHÈRES | 7 ATMOSPHÈRES | 8 ATMOSPHÈRES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| c. | mm. | mm. | mm. | mm. | mm | mm. | mm. |
| 50 | 3,90 | 4,80 | 5,70 | 6,60 | 7,50 | 8,40 | 9,50 |
| 55 | 3,99 | 4,98 | 5,97 | 6,96 | 7,95 | 8,93 | 9,93 |
| 60 | 4,08 | 5,16 | 6,24 | 7,32 | 8,40 | 9,48 | 10,56 |
| 65 | 4,17 | 5,34 | 6,51 | 7,68 | 8,85 | 10,02 | 11,19 |
| 70 | 4,26 | 5,52 | 6,78 | 8,04 | 9,30 | 10,56 | 11,82 |
| 75 | 4,35 | 5,70 | 7,05 | 8,40 | 9,75 | 11,10 | 12,45 |
| 80 | 4,44 | 5,88 | 7,32 | 8,76 | 10,30 | 11,64 | 13,08 |
| 85 | 4,53 | 6,06 | 7,59 | 9,12 | 10,65 | 12,18 | 13,71 |
| 90 | 4,62 | 6,24 | 7,86 | 9,48 | 11,10 | 12,72 | 14,34 |
| 95 | 4,71 | 6,42 | 8,13 | 9,84 | 11,55 | 13,26 | 14,97 |
| 100 | 4,80 | 6,60 | 8,40 | 10,20 | 12 | 13,80 | 15,60 |

Les ordonnances n'établissent aucune distinction entre les chaudières de fer et les chaudières de cuivre, quoique les résistances de ces deux métaux à la rupture soient différentes. Ces résistances sont à peu près entre elles comme 3 est à 2, en admettant que les poids qui produisent la rupture d'une barre ayant 1 centimètre carré de section soient 3000 kilog. pour le fer et 2000 kilog. pour le cuivre; ce sont les nombres minimums donnés par les expériences. Malgré les ordonnances, je pense qu'il est utile de donner aux chaudières de cuivre une plus grande épaisseur qu'aux chaudières de fer.

Comme les épaisseurs des tôles qui se trouvent dans le commerce ne varient pas d'une manière continue, depuis les plus petites jusqu'aux plus grandes, les constructeurs n'emploient que des tôles d'un petit nombre d'épaisseurs, et ils donnent aux chaudières des résistances plus grandes que celles qui sont indiquées par l'ordonnance. Le tableau suivant renferme les dimensions des chaudières et les épaisseurs de tôle, usitées dans l'un des plus grands établissements de chaudronnerie de Paris.

*Tableau des dimensions et des épaisseurs des chaudières pour une pression de 5 atmosphères.*

| NOMBRE de chevaux. | LONGUEUR des chaudières. | LONGUEUR des deux bouilleurs. | DIAMÈTRE des chaudières. | DIAMÈTRE des bouilleurs. | ÉPAISSEUR de la tête des chaudières. | ÉPAISSEUR de la tête des bouilleurs. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | m. | m. | mm. | mm. |
| 2 | 1,65 | 1,75 | 0,66 | 0,28 | 8 | 8 |
| 4 | 2,10 | 2,20 | 0,70 | 0,30 | 8 | 8 |
| 6 | 2,45 | 2,60 | 0,75 | 0,35 | 9 | 10 |
| 8 | 2,80 | 2,95 | 0,80 | 0,38 | 10 | 10 |
| 10 | 3,25 | 3,40 | 0,80 | 0,35 | 10 | 10 |
| 15 | 5,00 | 5,15 | 0,80 | 0,44 | 10 | 10 |
| 20 | 6,80 | 7,00 | 0,85 | 0,50 | 10 | 10 |
| 25 | 8,50 | 8,65 | 0,85 | 0,50 | 10 | 10 |
| 30 | 9,20 | 9,50 | 1,00 | 0,60 | 10,5 | 10 |
| 40 | 10,00 | 10,30 | 1,10 | 0,60 | 11 | 10 |

743. En mettant à part les deux premières chaudières, dont les surfaces sont trop grandes, toutes les autres ont des surfaces de chauffe qui correspondent à peu près à $1^m,70$ par cheval; en admettant 5 kilogrammes de houille par cheval et par heure, et 5 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, la surface de chauffe correspond à peu près à 15 kilogrammes de vapeur par mètre carré et par heure.

744. Les ordonnances ne parlent pas des chaudières garnies de tubes intérieurs, probablement parce que cette disposition est rarement employée pour les chaudières à haute pression. On peut se rendre compte de la résistance des tuyaux soumis à des pressions extérieures, en remarquant que, si les tubes étaient exactement circulaires, partout d'une égale épaisseur, et si la pression extérieure était la même sur tous les points, cette pression tendrait à écraser le tuyau dans toutes les directions; et comme la résistance des métaux à l'écrasement est plus grande que leur résistance à la rupture par traction, le tuyau offrirait une plus grande résistance à la pression quand celle-ci est extérieure que quand elle est intérieure. Mais si les diamètres du tuyau n'étaient pas parfaitement égaux, ou si, même pendant un temps très-

court, les pressions n'étaient pas les mêmes sur toute sa surface, les forces extérieures tendraient à l'aplatir, d'autant plus que l'aplatissement aurait fait plus de progrès, et le métal ne résisterait qu'à la flexion. Ainsi il faut éviter l'emploi des tuyaux intérieurs, du moins pour les chaudières à haute pression, à moins qu'on ne puisse leur donner un petit diamètre et une grande épaisseur.

745. Les épaisseurs des chaudières, déterminées par la formule (2), paraissent devoir mettre à l'abri de tout accident, car elles dépassent de 3 millimètres dix fois l'épaisseur qui correspond à la rupture; mais par la construction même des chaudières, et par la température qu'elles prennent dans les fourneaux, l'excès de résistance est en réalité beaucoup plus petit. D'abord les feuilles de tôle sont réunies par des rivets également espacés, dont les diamètres diffèrent peu des intervalles qui les séparent, et par cette seule circonstance la résistance de la chaudière est diminuée de moitié. Aussi, dans presque toutes les chaudières qui ont éclaté, la rupture a eu lieu suivant une ligne qui passe par les centres des trous occupés par les rivets. En outre, les chaudières sont toujours à une température moyenne, qui dépasse de beaucoup celle de la vapeur, car c'est en vertu de la différence de température des deux surfaces de la chaudière que la chaleur la traverse, et on sait que la ténacité des métaux diminue beaucoup avec la température.

746. *Essais des chaudières.* L'essai d'une chaudière est important, 1° parce qu'il peut faire connaître des fuites qui ne se seraient pas manifestées sous la pression atmosphérique; 2° parce que le métal, quoique d'une épaisseur suffisante, peut avoir des parties plus faibles, surtout aux clouures et aux soudures, et quand il est en métal coulé, la fonte peut avoir des défauts; circonstances qui feraient éclater la chaudière avec de grands dangers si la pression était due à la vapeur, au lieu que l'eau la fait rompre sans qu'il en résulte aucun accident pour les personnes qui font l'opération.

Mais pour que ces essais puissent donner une certitude complète que la chaudière résistera à la pression de la vapeur, il faudrait connaître la température maximum que le métal atteindra, la ténacité du métal à cette température, et il faudrait opérer à froid, sous une pression convenable. L'incertitude qui règne sur tous ces points, rend souvent presque illusoire l'épreuve dont il est question.

Les ordonnances exigeaient un essai à froid, sous une pression 5 fois plus forte que celle que les chaudières devaient supporter. La pression est maintenant réduite au double. L'opération consiste à remplir la chaudière d'eau, et à la refouler à l'aide d'une pompe, en chargeant convenablement les soupapes.

## § 2. — INDICATEURS DE NIVEAU.

747. Dans toutes les chaudières à vapeur, quel que soit leur usage, il est extrêmement important de connaître, à chaque instant, la position du niveau de l'eau, car ce niveau doit être maintenu à une hauteur constante, et l'indication dont il s'agit sert à régler l'alimentation. Si le niveau s'abaissait beaucoup au-dessous de la limite de chauffe, il pourrait en résulter de graves inconvénients, comme nous l'expliquerons en parlant des explosions des chaudières à vapeur. Si le niveau s'élevait beaucoup au-dessus, le magasin de vapeur pourrait devenir trop petit, et il en résulterait des inconvénients d'un autre genre.

Aussi, toutes les chaudières à vapeur sont pourvues d'appareils destinés à faire connaître à chaque instant la hauteur de l'eau dans la chaudière. Nous décrirons successivement tous ceux qui sont employés et ceux qui ont été proposés.

748. *Appareils à robinets.* La figure 1re (pl. 18) représente le plus ancien appareil de niveau. Il est formé de deux tubes qui traversent la chaudière et dont les extrémités intérieures comprennent entre elles le niveau auquel l'eau doit être maintenue; les autres extrémités des tubes sont garnies de petits robinets. Il est évident que quand le niveau de l'eau sera compris entre les extrémités des tubes, un des robinets ne devra laisser sortir que de la vapeur, et l'autre de l'eau. Les clefs des robinets sont en bois, afin que le chauffeur puisse facilement les tourner sans se brûler. Chaque tube est garni d'un collet qui s'appuie contre la surface extérieure de la chaudière, et qui est fortement serré par un écrou placé en dedans; avant de serrer l'écrou on met une couche de mastic de fonte entre le collet et la chaudière.

749. Pour éviter les causes d'erreur qui peuvent résulter de l'agitation de l'eau par le fait même de l'ébullition, il serait très-utile de placer dans la partie de la chaudière où se trouvent les extrémités des tubes,

un panier en tôle, fixe, percé d'un grand nombre de petits trous : la petite étendue des orifices de communication avec l'eau de la chaudière atténuerait les oscillations, et le niveau serait sensiblement horizontal dans l'intérieur du panier.

La figure 2 (pl. 18) représente une disposition analogue. Les tubes sont droits et placés à des hauteurs qui comprennent le niveau que l'eau doit conserver dans la chaudière. Par cette disposition les tubes peuvent se monter à vis sur la chaudière.

750. La figure 3 (pl. 18) représente un appareil fondé sur le même principe, mais qui permet de déterminer la hauteur du niveau, quand même il aurait éprouvé de grandes variations. Il se compose d'un tube droit, vertical, gradué, et mobile dans le sens de sa longueur à travers une boîte à étoupe; ce tube est garni d'un petit robinet à sa partie supérieure. On l'abaisse progressivement en le tenant par le manche *ab*, jusqu'à ce que le robinet *c* donne de l'eau; on lit alors sur le tube la distance du niveau de l'eau à un point fixe qu'on a pris pour point de départ. La figure 4 représente le tube et la boîte à étoupe sur une plus grande échelle; *mnm'n'* est un tube garni d'un rebord qui s'appuie sur la chaudière; il est serré, et le joint est rendu étanche par un écrou *pp'* qui se visse en dedans de la chaudière, et qui porte une rondelle de carton garnie de mastic rouge; ce tube porte la pièce *qq'* qui comprime les étoupes grasses *r*, et qui est percée d'un canal qui donne passage au tube mobile; la capsule qui termine cette pièce est destinée à recevoir la graisse qu'on doit de temps en temps verser sur les étoupes. On voit par la disposition de la courbure de la partie inférieure de la pièce mobile, qu'en la descendant, on comprime les étoupes contre le tube.

751. La figure 5 (pl. 18) représente un appareil à l'aide duquel on peut également déterminer la hauteur du niveau, mais par un moyen différent. Le tube par lequel doit se dégager l'eau ou la vapeur, est horizontal et mobile autour de son axe à travers une boîte à étoupe. Son extrémité est courbée à angle droit. On voit d'après cette disposition, qu'en tournant le tube au moyen du manche *ab* jusqu'à ce qu'il sorte de l'eau par le robinet, la flèche, qui est parallèle et égale à la partie recourbée du tube, indiquera la hauteur du niveau.

752. On peut ranger dans la même classe l'appareil figure 6, qui est souvent employé dans les chaudières anglaises. *abcd* est une pièce en cuivre,

filetée à son extrémité et introduite dans un trou taraudé d'une chaudière; cette pièce est percée d'un canal central occupé par une tige d'un diamètre peu différent, terminé d'un côté par une soupape qui, dans la position indiquée par la figure, ferme complétement l'orifice du tube; l'autre extrémité de la pièce intérieure est terminée par une espèce de chapeau *m*, monté à vis. Le tube intérieur communique avec un petit canal latéral *e*, ouvert à l'extérieur. Lorsqu'on veut savoir si l'eau dans la chaudière est à la hauteur du tube, on donne un petit coup sec sur la tête de la tige, la pression intérieure la ramène aussitôt à sa position primitive; mais dans l'intervalle il se dégage par l'ouverture *e* de l'eau ou de la vapeur, suivant que le niveau de l'eau est au-dessus ou au-dessous du tube.

Ces différents moyens de reconnaître le niveau de l'eau offrent peu de certitude, parce que, par la diminution de pression produite par l'ouverture du robinet, à l'extrémité intérieure du tube, et qui se manifeste d'abord sur la partie de la surface de l'eau qui est la plus voisine de cette extrémité, il se produit un bouillonnement et une élévation partielle du niveau qui peut porter de l'eau à l'extrémité du tube. Ce fait a été reconnu par des expériences directes, faites, il y a quelques années, à l'institut Francklin. La chaudière était garnie de deux plaques de verre épais, dont l'une servait à éclairer l'intérieur de la chaudière, et l'autre à observer ce qui s'y passait.

753. *Appareils à tubes communicants.* Ces appareils consistent en un tube de verre vertical qui communique par sa partie inférieure avec la partie de la chaudière qui doit toujours être remplie d'eau, et par sa partie supérieure avec la chambre de vapeur. Il est évident que par cette disposition, le liquide se met dans le tube au même niveau que dans la chaudière. La figure 7 (pl. 18) représente la disposition la plus simple de ces appareils. Les deux pièces en cuivre *abcd* et *a'b'c'd'*, percées de part en part et dans deux directions perpendiculaires, sont fixées par des écrous roulants *m* et *m'* aux deux tubes *p* et *p'* fixés eux-mêmes à la chaudière; elles reçoivent les deux extrémités du tube de verre *ef* qui y sont maintenues par de la filasse et du mastic rouge. Les écrous *a* et *a'* qui ferment les douilles verticales, servent à introduire le tube de verre. Les douilles *b* et *b'* servent à nettoyer les tubes de communication. Le panier placé dans l'intérieur de la chaudière a

pour objet de diminuer les oscillations de l'eau dans le tube; oscillations qui, sans cette disposition, ne permettraient pas d'observer le niveau avec une précision suffisante. Cet appareil a plusieurs graves inconvénients : le premier est de ne pas maintenir à une distance constante les douilles en cuivre que la pression de la vapeur tend à séparer; le second est de ne pas permettre de remplacer facilement le tube de verre pendant le travail, quand il vient à se briser. La disposition représentée dans les deux figures 8 et 9 (pl. 18) n'a pas ces inconvénients; la tige $tt'$ sert à maintenir les deux douilles; les robinets $x, x'$ à intercepter la communication de l'appareil avec la chaudière, quand le tube de verre est cassé. Les demi-anneaux $z$ et $z'$ sont destinés à préserver l'appareil des instruments des chauffeurs.

754. La figure 10 (pl. 18) représente l'appareil de niveau d'eau employé dans les chaudières des machines locomotives. Cet appareil a la plus grande analogie avec le précédent. Les robinets $x$ et $x'$ servent à établir ou à intercepter la communication de l'appareil avec la chaudière; les boîtes à étoupe $a$, $a'$, servent à rendre étanches les joints du tube de verre avec les douilles qui doivent le recevoir; les petits boulons $b$ et $b'$ servent à nettoyer les tuyaux de communication de l'appareil avec la chaudière, et enfin le robinet $c$ sert à nettoyer le tube en y faisant passer un courant d'eau.

755. Les figures 11 et 12 (pl. 18) représentent un appareil plus simple employé dans quelques grandes chaudières à vapeur. Les douilles $m,n$, qui reçoivent le tube de verre, sont réunies par deux tiges $ab$ et $a'b'$ qui maintiennent leur écartement. La douille $n$ a intérieurement un talon sur lequel repose le tube de verre, et elle est garnie d'un tube à robinet qui communique avec la partie inférieure de la chaudière. La douille supérieure a un diamètre qui excède celui du tube; elle est fermée supérieurement par un bouchon maintenu par une vis, et garni latéralement d'un tube à robinet qui communique avec la chambre à vapeur de la chaudière. Cette disposition est simple, mais il est difficile de rendre bien étanches les joints du tube et des douilles.

756. Enfin, les figures 13 et 14 représentent l'appareil de niveau d'eau de M. Hoyau. Il ne diffère de ceux que nous avons décrits que par des détails de construction qui sont faciles à comprendre à l'inspection des figures. Il y a cependant dans cet appareil une innovation utile que

nous devons indiquer : la douille inférieure renferme une pièce de cuivre sphérique reposant sur un siége percé de plusieurs orifices qui établissent la communication de la partie inférieure de la chaudière avec le tube de verre; quand par accident le tube vient à se casser, l'eau de la chaudière soulève la sphère, qui ferme alors complétement l'orifice supérieur de la douille, et arrête, par conséquent, l'écoulement de l'eau de la chaudière. Ces boules ont en outre l'avantage de diminuer l'amplitude des oscillations du niveau de l'eau dans le tube. L'appareil est disposé de manière à recevoir la vapeur par la partie supérieure et à communiquer latéralement avec un manomètre; mais en fermant le tuyau supérieur, et en faisant communiquer les deux tuyaux latéraux avec la chaudière, l'appareil servirait seulement à l'indication du niveau de l'eau. L'appareil ainsi simplifié est bien supérieur, sous tous les rapports, à ceux que nous avons décrits précédemment.

M. J. J. Meyer de Mulhausen a introduit plusieurs modifications importantes dans l'appareil de M. Hoyau. Pour éviter l'encrassement des tubes de verre, il fait communiquer la partie supérieure de l'appareil avec la chaudière par un tube large et d'un assez grand développement, disposé de manière que la vapeur condensée dans ce tube tombe dans le tube de verre. Pour éviter la fracture de ce dernier par les courants d'air, il l'enveloppe d'un autre d'un plus grand diamètre, qui repose sur les bords de la boîte à étoupe inférieure, ou il place l'appareil dans une cage de verre. D'après le rapport d'un comité de la société industrielle de Mulhausen, des appareils de M. Meyer qui fonctionnaient depuis une année, n'avaient éprouvé aucun accident, et les tubes de verre étaient encore parfaitement nets.

757. *Appareils à flotteurs.* L'appareil le plus simple est représenté figure 15 (pl. 18). Le flotteur est composé de deux calottes en cuivre *ab* et *cd*, soudées sur leurs bords; ce flotteur, qui doit être plus léger que l'eau, est surmontée d'une tige métallique *ef* qui traverse deux guides *m* et *n*, et s'élève dans une cloche de verre *gh* d'un petit diamètre, mastiquée dans une douille *ik* fixée sur la chaudière.

Lorsque les deux calottes du flotteur ont été soudées, le corps lenticulaire renfermait de l'air à la température et à la pression extérieure; alors, quand il sera plongé dans l'eau à des températures de 100°, 121°, 135°, 145°, 153°, 160°, 166°, 172°, qui correspondent à des

forces élastiques de la vapeur de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 atmosphères, la force élastique de l'air renfermé dans le flotteur sera de 1,36; 1,43; 1,48; 1,52; 1,55; 1,57; 1,59; 1,61 atmosphères; alors la pression extérieure tendra d'autant plus à écraser la lentille que la pression de la vapeur sera plus considérable, et, par conséquent, on devra donner aux lames de métal dont elle est formée une très-grande épaisseur. Mais si, avant de fermer la lentille, on y avait introduit une certaine quantité d'eau, suffisante pour remplir sa capacité de vapeur saturée à la plus haute température de l'eau dans la chaudière, il est évident que pour les forces élastiques de la vapeur dans la chaudière 1 à 8 atmosphères, les pressions intérieures seraient de 2,36; 3,43; 4,48; 5,52; 6,55; 7,57; 8,59 et 9,61 atmosphères; ainsi, la pression intérieure excéderait la pression extérieure d'une quantité qui croîtrait de 1,36 à 1,61 atmosphères. On voit, d'après cela, qu'il est toujours avantageux d'introduire de l'eau dans le flotteur, parce qu'il peut alors résister à la rupture avec une épaisseur de métal beaucoup plus petite que quand il ne renferme que de l'air.

758. Les figures 16 et 17 (pl. 18) représentent un appareil disposé d'une autre manière. Le flotteur en pierre A est équilibré par un contre-poids B, de manière à être plus léger que l'eau. La chaîne qui réunit ces deux corps passe sur une poulie fixe dont l'axe traverse une boîte à étoupe, et se termine par un index qui parcourt un cadran où se trouve indiquée la hauteur de l'eau dans la chaudière.

759. La figure 1re (pl. 19) représente un appareil à flotteur plus léger que l'eau, qui, en s'abaissant au-dessous de la limite assignée, ouvre la soupape *m*, qui laisse dégager la vapeur par un tuyau d'orgue dont le bruit avertit le chauffeur.

760. La figure 2 (pl. 19) représente un appareil qui produit le même effet. Le flotteur en pierre A est équilibré par un contre-poids B; la tige creuse qui le supporte traverse une boîte à étoupe *c*; cette tige renferme un tuyau d'orgue dans lequel la vapeur peut s'introduire par un orifice qui ne se trouve dans la chaudière que quand le flotteur est descendu au-dessous d'une certaine limite.

761. Dans la figure 3 (pl. 19) l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière, au-dessous d'une certaine limite, est indiqué par le dégagement de la vapeur à l'extrémité d'un tube. L'appareil se compose d'un

tube vertical *ab*, d'un grand diamètre, ouvert par les deux bouts, dont l'extrémité inférieure plonge dans la chaudière jusqu'à la limite assignée, et qui s'élève à une hauteur qui excède le maximum de pression de la vapeur dans la chaudière, et d'un tube *mn*, d'un petit diamètre, dont l'extrémité se trouve à une petite distance du chauffeur.

762. La figure 4 (pl. 19) représente la disposition la plus simple des appareils à flotteurs. A est un flotteur en pierre équilibré par le contre-poids P; la tige *ab* est un fil de cuivre d'un diamètre seulement suffisant pour soutenir le flotteur; il passe à travers une boîte à étoupe *c*, et se termine par une petite chaîne qui passe sur la gorge de la poulie M. Une aiguille fixe *mn* indique sur un cadran *pq*, fixé à la poulie, la hauteur du niveau. On pourrait évidemment remplacer la poulie par un balancier, comme dans la figure 2.

763. Lorsqu'on connaît le volume et la densité du flotteur, il est facile de déterminer le poids P qu'il est nécessaire de placer à l'autre extrémité du levier, pour que le flotteur reste en équilibre stable, plongé à moitié dans l'eau. En effet, en désignant par V le volume du flotteur, par *d* sa densité et par *l* et *l'* les deux bras du balancier, on aura

$$(\mathrm{V}d - \tfrac{1}{2}\mathrm{V})l = \mathrm{P}l', \quad \text{d'où} \quad \mathrm{P} = \mathrm{V}\left(\frac{2d-1}{2}\right)\frac{l}{l'}.$$

764. On a proposé de placer le flotteur et son contre-poids dans la chaudière, et en dehors un petit contre-poids pour tendre le fil. Cette disposition, imaginée par M. Chaussenot, a l'avantage de permettre l'emploi d'un fil très-fin qui offre peu de résistance dans son mouvement à travers la boîte à étoupe. Pour que l'appareil soit plus sensible, l'axe de rotation est formé d'un cylindre soutenu par deux cônes qui s'engagent dans des trous de même forme pratiqués aux deux extrémités; ce mode de suspension est représenté dans la figure 9 (pl. 24). Cette disposition est préférable aux autres; elle a seulement l'inconvénient d'embarrasser la chambre de vapeur.

765. M. Schlumberger, de Mulhausen, place le contre-poids dans la chaudière; l'axe de rotation sort à travers une boîte à étoupe, et porte à son extrémité l'aiguille indicatrice. Mais, par cette disposition, le niveau n'est indiqué par l'aiguille que dans des limites de hauteur très-peu étendues, attendu que, pour une petite inclinaison du balancier, ses extrémités touchent la chaudière. Pour éviter cet inconvénient, il

a placé, depuis, le contre-poids en dehors à l'extrémité d'un levier fixé à l'axe de rotation. M. Schlumberger pense que cette disposition est préférable aux anciennes, dans lesquelles la portion du fil qui frotte dans la boîte à étoupe s'use rapidement, et où il est alors difficile de s'opposer à la perte de vapeur; il ajoute que, par cette nouvelle disposition, la force qui produit le mouvement, agissant à l'extrémité d'une longue tige, a plus de facilité pour vaincre les frottements. Mais cet avantage est compensé par le plus grand diamètre de l'axe qui augmente la surface frottante. Cet appareil est embarrassant, plus cher que les anciens, et ne présente réellement aucun avantage.

766. L'appareil représenté par la figure 5 (pl. 19) est disposé d'une autre manière : le flotteur AA est annulaire; il est fixé par deux ou trois tiges de fer à une masse B, à l'extrémité de laquelle est attaché un fil de cuivre qui traverse un tube ouvert par les deux bouts, dont la partie inférieure descend au-dessous du niveau de l'eau dans la chaudière, et dont l'autre s'élève à une hauteur qui excède celle de l'eau correspondante au maximum de pression de la vapeur; le fil se termine par une chaîne qui passe sur deux poulies fixes et se termine par un contre-poids P. La hauteur du niveau de l'eau dans la chaudière est indiquée par la position du poids P sur l'échelle *mn*. Le tube de niveau *ab* sert à indiquer la pression de la vapeur, du moins dans les limites déterminées par sa hauteur et sa position. Par cette disposition, on évite le frottement des fils de suspension des flotteurs dans les boîtes à étoupe; mais on ne peut évidemment s'en servir que pour les chaudières à basse pression.

767. Les figures 6 et 7 (pl. 19) représentent l'appareil de niveau qui est employé dans les chaudières de bateaux à vapeur. Il se compose d'une boule creuse en cuivre, terminée par un tube recourbé, à angle droit, fermé, à l'extrémité duquel se trouve une aiguille; la partie *ab* est mobile dans une boîte à étoupe fixée horizontalement dans la face verticale de la chaudière qui se trouve en avant; l'aiguille marque, sur un cadran placé contre la chaudière, la hauteur de l'eau.

768. Enfin, on pourrait observer directement le niveau de l'eau dans la chaudière, en employant la disposition indiquée dans la figure 8 (pl. 19); elle consiste en deux tubulures opposées, convenablement inclinées, fermées par deux plaques de verre épais; par l'une, on éclaire la surface

de l'eau; et par l'autre, on peut mesurer sa hauteur sur une tige graduée fixée verticalement dans la chaudière.

Dans toutes les figures des appareils de niveau à flotteur, nous avons indiqué, autour du flotteur, une enveloppe métallique percée de trous, afin de diminuer l'amplitude des oscillations du flotteur, et de permettre de mesurer plus facilement la hauteur du niveau moyen; mais il est important de laisser à ces enveloppes des communications assez étendues avec la chaudière, pour qu'il reste dans le vase intérieur un petit mouvement oscillatoire nécessaire pour s'opposer à l'adhérence du fil dans la boîte à étoupe; d'ailleurs on s'assure, par ces petits mouvements, que l'appareil marche librement et que les étoupes ne sont pas trop comprimées.

769. On a imaginé un grand nombre de dispositions différentes d'appareils qui produisent un grand bruit lorsque le niveau s'est abaissé au-dessous de la limite fixée; nous en avons indiqué plusieurs. Celui qui paraît fonctionner avec le plus de régularité, est celui de M. Chaussenot (fig. 8, 9 et 10, pl. 24); il consiste en un flotteur intérieur qui ouvre une soupape qui communique avec un sifflet.

770. Dans les grandes chaudières à vapeur, il est toujours indispensable d'avoir à la fois un indicateur de niveau à tube, et un indicateur à flotteur. Pour le premier, la disposition de M. Hoyau, avec les modifications apportées par M. Mayer, est bien préférable à toutes les autres. Pour l'indicateur à flotteur, le plus simple, celui qui est représenté par la figure 4 (pl. 19), me paraît devoir être employé de préférence, en donnant au fil de cuivre le diamètre seulement suffisant; mais, pour ces deux appareils, il faudrait diminuer l'amplitude des oscillations par les paniers de tôle dont nous avons parlé. Il serait aussi très-utile d'employer un flotteur à sifflet disposé comme dans les figures 1 (pl. 22), ou 8, 9 et 10 (pl. 24). Quant aux chaudières de bateaux, on ne peut employer que l'appareil des figures 6 et 7 (pl. 19).

## § 3. — MANOMÈTRES.

771. Les manomètres servent à indiquer à chaque instant la pression de la vapeur dans la chaudière; ces instruments sont d'une nécessité absolue : la raison en est trop évidente pour qu'il soit nécessaire d'insis-

ter sur leur importance. Les manomètres sont disposés de différentes manières, suivant qu'ils sont destinés à des chaudières à basse pression ou à haute pression.

*Manomètres pour les chaudières à basse pression.*

772. La disposition le plus généralement employée pour les manomètres à basse pression, consiste en un canon de fusil recourbé de manière à former deux branches parallèles; les deux branches sont placées verticalement : l'extrémité de l'une d'elles est mise en communication avec la partie supérieure de la chaudière; l'autre est ouverte et se termine par une échelle divisée; on introduit du mercure dans les deux branches, et une tige de bois dans celle qui est ouverte; les mouvements du mercure occasionnés par les variations de pression sont indiqués sur l'échelle par l'extrémité du flotteur. Les figures 9, 10 et 11 (pl. 19) représentent cette disposition. Il est évident que l'extrémité du flotteur correspond au zéro de l'échelle quand le mercure est au même niveau dans les deux branches du tube, et que, pour avoir la pression de la vapeur dans la chaudière, il faut ajouter à la hauteur du baromètre, le double de la hauteur de l'extrémité du flotteur, en supposant toutefois que les deux parties du tube aient exactement le même diamètre. Pour éviter de doubler la hauteur, les échelles sont ordinairement divisées en demi-centimètres qui sont marqués centimètres.

773. Il est facile de voir ce qu'il y aurait à faire si les deux parties du tube avaient des diamètres différents; en désignant par D le diamètre de la partie du tube qui est en communication avec la chaudière, par $d$ celle de l'autre branche, il est évident que, quand le mercure montera de $h$ dans cette dernière branche, il descendra de $h \times d^2 : D^2$ dans l'autre, et par conséquent que la différence de niveau dans les deux branches sera

$$h + h.\frac{d^2}{D^2} = h\left(\frac{D^2+d^2}{D^2}\right),$$

et par conséquent, pour que les divisions de l'échelle donnent directement l'excès de la pression de la vapeur sur la pression atmosphérique en centimètres, les divisions devront être égales à

$$1^c.\frac{D^2}{D^2+d^2}.$$

Ce mode de construction peut présenter des erreurs assez notables, dues à la quantité d'eau plus ou moins considérable que renferme la branche en communication avec la chaudière. Cependant, comme cette partie du tube est en général toujours pleine d'eau, on peut estimer assez facilement la correction à faire. En supposant que le zéro de l'échelle ait été pris quand la chaudière ne fonctionnait pas, et que la branche en communication avec elle était pleine d'eau, il est évident que, quand le mercure descendra dans cette branche de 1 centimètre la colonne de mercure sera remplacée par une colonne d'eau, et qu'alors la différence du niveau, estimée en mercure, ne sera plus que de

$$h + h.\frac{d^2}{D^2}.\frac{25}{27} = h.\left(\frac{27\,D^2 + 25\,d^2}{27\,D^2}\right),$$

et par conséquent que chaque division de l'échelle, correspondante à 1 centimètre, ne devra avoir qu'une longueur égale à

$$1^c.\frac{27D^2}{27D^2 + 25d^2},$$

et, dans le cas ordinaire ou $D = d$, cette longueur sera

$$1^c.\frac{27}{52} = 0{,}519.$$

On voit, d'après cela, que la cause d'erreur que nous venons de signaler, n'a réellement de l'influence qu'autant que le tube ne reste pas plein d'eau. On peut le maintenir constamment dans cet état en plaçant à son origine un réservoir dans lequel le niveau ne pourrait éprouver que des variations insensibles pour les plus grandes variations de niveau du mercure.

Ces appareils servent de soupapes de sûreté. En effet, le maximum de hauteur de la colonne de mercure étant égal à la longueur de la branche ouverte, aussitôt que la pression de la vapeur aura fait descendre le mercure au point le plus bas de la courbure du tube, la vapeur s'échappera en entraînant le mercure. Pour éviter la perte de ce métal, on peut disposer l'appareil comme l'indiquent les figures 12 et 13 (pl. 19); dans la première, le tube d'ascension est en verre; dans l'autre, il est en fer.

774. La figure 14 (pl. 19) représente un appareil de même nature, destiné à une chaudière produisant de la vapeur à deux ou trois atmosphères. Le flotteur est en fer et équilibré en partie par un contre-poids

auquel il est relié par un fil métallique très-fin ou un cordon qui passe sur une poulie fixe; le contre-poids parcourt une échelle divisée qui indique la pression de la vapeur. Lorsque la pression dépasse la limite assignée, le contre-poids lâche la détente d'une sonnerie; c'est une précaution importante pour prévenir la négligence du chauffeur ou son absence momentanée, et surtout pendant la nuit, pour le réveiller s'il s'abandonnait au sommeil.

775. MM. Nicolas Kœchlin et frères, de Mulhausen, ont adapté, à l'indicateur de leur manomètre, un mécanisme qui agite longtemps une sonnerie lorsque la pression de la vapeur a dépassé la limite de tension fixée, et qui en même temps abaisse le registre de la cheminée; cette disposition est représentée figure 15 (pl. 19).

AA, longue branche du siphon; BB, courte branche coudée en C qui se rend à la chaudière en H; D, index en cuivre; E, flotteur en fer; F, poulie en cuivre qui soutient le fil qui unit le poids E avec l'index D; GG, planche fixée à la maçonnerie de la chaudière, et qui porte le baromètre et son échelle; I, plateau sur lequel le mécanisme de la sonnerie est placée; K, pièce plate en fer fixée sur l'arbre de la poulie N : elle porte en L un excentrique pour agiter la sonnette M; OO, corde enveloppée autour de la poulie N; P, poids attaché à la corde pour la tenir tendue; Q, second poids qui fait tourner rapidement la poulie N avec la pièce K, quand cette dernière est dégrénée; R, levier qui engrène avec la pièce K par un arrêt T; S, pièce qui glisse le long d'un fil tendu sur la planche du baromètre, et qui est attachée au levier R; quand l'index vient à la toucher, elle tire le levier R et le dégrène; U, contre-poids du registre; V, levier en communication avec le verrou X qui retient la crémaillère Y du registre. Lorsque le levier R dégrène la poulie N et fait sonner, le contre-poids P soulève le levier, décroche le verrou X, et ferme le registre; la poignée Z sert à donner au registre la position voulue, indépendamment du mécanisme ci-dessus; *n*, rochet à double cliquet fixé sur la poulie N, pour empêcher la sonnerie d'agir pendant que l'on remonte le mécanisme.

776. Les figures 16, 17 et 18 (pl. 19) représentent deux coupes verticales d'une autre disposition de manomètres à basse pression. Cet appareil se compose d'une cuvette en fonte rectangulaire, pleine de mercure, et fixée contre une muraille; elle reçoit la vapeur par un tuyau *ab* qui

s'élève au-dessus du niveau du mercure; et le mercure monte par la pression de la vapeur, dans un tube plus ou moins long qui plonge jusqu'au fond de la cuvette. Ce tube se termine à la partie supérieure par un petit chapeau destiné à empêcher la projection du métal, dans le cas où la tension de la vapeur dépasserait la limite de pression que peut indiquer l'appareil, et il est environné à cette même extrémité d'un vase destiné à recevoir le mercure qui s'échapperait dans le cas dont il est question. Le tube est fixé dans la cuvette par du mastic de fonte comprimé dans l'intervalle qui le sépare de la douille destinée à le recevoir, et le vase supérieur est fixé au tube d'une manière quelconque.

777. La partie de cet appareil qui a pour objet d'éviter la projection du mercure quand la pression de la vapeur dépasse le maximum de pression, pourrait évidemment s'appliquer aux appareils que nous avons déjà décrits.

778. Les figures 1, 2, 3, 4, 5 (pl. 20) représentent le manomètre à sonnerie et à bascule de M. Edwards. Figure 1, coupe verticale; figure 2, vue de côté; figure 3, plan de la soupape de sûreté; figure 4, plan du réservoir à mercure; figure 5, coupe à une plus grande échelle de la partie supérieure du manomètre.

*a*, réservoir à mercure communiquant avec la chaudière à vapeur par un tube *b* muni d'un robinet *b'*. *c*, colonne montante faisant fonction d'un manomètre à air libre. *d*, flotteur qui se lève quand le mercure atteint une hauteur suffisante. *e*, collier à échappement faisant partie du flotteur, et destiné à empêcher le treuil *m* de tourner avant que le flotteur soit soulevé. *f*, tige qui, en tournant, agite la sonnette quand le flotteur a fait lever le collier à échappement. *g*, colonne descendante par laquelle le mercure se rend dans le réservoir *h* placé à l'extrémité du levier de la soupape de sûreté, et dont la capacité est telle que le poids du mercure qui peut y être contenu fasse soulever la soupape, indépendamment de la pression de la vapeur qui tend à produire le même effet. *i*, levier de la soupape de sûreté. *k*, contre-poids. *l*, soupape de sûreté. *m*, treuil monté sur la tige *f*, et sur lequel s'enroule la corde *n* qui porte le poids *o*. *p*, mentonnet fixé sur l'axe *f* et qui, en frappant contre le levier *q*, agite la cloche *r* lorsque le treuil tourne, entraîné par le poids *o*. *s*, ressort fixé au levier *q*, et qui ramène la cloche.

779. Une disposition analogue a été imaginée par M. Henri, de Mulhausen; mais la vapeur n'agit pas immédiatement sur le levier de la soupape, et l'écoulement d'une très-petite quantité de mercure est suffisante pour faire ouvrir la soupape. Dans cet appareil, lorsque le mercure se déverse, il tombe dans un bocal en tôle qui agit sur une détente très-sensible par le moyen de tringles et de leviers qui dégagent un marteau; celui-ci, en tombant, frappe un long levier qui d'horizontal qu'il était devient vertical, ferme le robinet de communication de la chaudière avec le manomètre, et ouvre un autre robinet qui établit une large communication de la chaudière avec l'air; 30 grammes de mercure suffisent pour faire jouer l'appareil (Société d'encouragement, tome 32). Cet appareil est encore plus compliqué que le précédent, et n'a pas été adopté.

*Manomètres destinés aux chaudières à haute pression.*

780. Les dispositions que nous avons décrites ne pouvant s'appliquer que difficilement aux chaudières à haute pression, à cause de la grande longueur des tubes qu'il faudrait employer, on a imaginé d'autres appareils fondés sur un principe différent.

La figure 6 (pl. 20) représente la disposition la plus simple d'un manomètre à haute pression; cet appareil consiste en un tube de verre *abcd*, formant deux branches parallèles à peu près égales, fermé à l'extrémité *a*, renfermant de l'air et du mercure, et communiquant par l'extrémité *d* avec un tuyau, garni d'un robinet M, qui se rend à la partie supérieure de la chaudière. Le mercure s'élève à peu près à la moitié de la hauteur des tubes. Quand la pression de la vapeur excède celle de l'atmosphère, le mercure monte dans le tube *ab*, et la pression de la vapeur se trouve mesurée par la force élastique de l'air comprimé dans le tube, qu'on déduit de son volume, et par la différence de hauteur des deux colonnes. En désignant par H la longueur de la partie du tube occupée par la colonne d'air à la pression atmosphérique, par $h$ la hauteur dont s'élève le mercure dans la branche *ab*, sous une pression P de la vapeur, on aura évidemment

$$P = 2h + 0{,}76.\frac{H-h}{H}, \qquad (1)$$

équation d'où l'on tire

$$h = \frac{H(P-0{,}76)}{2H-0{,}76}. \qquad (2)$$

Alors, en donnant à P successivement les valeurs qui correspondent à $\frac{5}{4}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{7}{4}$, 2, 3 atmosphères, la dernière équation donnera les valeurs de $h$ qui correspondent à ces différentes pressions. Ces calculs supposent que le tube ait partout le même diamètre, et que sa partie supérieure soit terminée par une surface plane. Pour plus d'exactitude, on pourrait diviser le tube en parties d'égale capacité; alors, aux divisions correspondantes aux $\frac{4}{5}$ . $\frac{3}{4}$ . $\frac{2}{3}$ . $\frac{1}{2}$ du volume primitif correspondraient des forces élastiques de $\frac{5}{4}$ . $\frac{4}{3}$ . $\frac{3}{2}$ . 2... atmosphères, mais seulement pour l'air comprimé, et il faudrait y ajouter la différence des niveaux du mercure dans les deux tubes, estimée en atmosphère. Pour éviter l'embarras de cette dernière correction, et même celui de la division du tube en parties d'égales capacités, on construit un manomètre étalon avec beaucoup de soin, et on gradue les autres sur celui-là, en les soumettant, au moyen d'une pompe, à des pressions égales croissantes de quart en quart d'atmosphère.

781. Dans l'appareil figure 7 (pl. 20), le niveau du mercure reste sensiblement constant dans une des branches; pour cet appareil, la formule (1) serait applicable en changeant $2h$ en $h$.

Il est important de donner une grande longueur aux deux branches du tube qui se trouvent au-dessous du niveau constant du mercure, afin que l'air, par les variations brusques de pression, ne puisse pas en sortir.

782. Pour éviter de donner une trop grande longueur au tube qui renferme l'air, on peut employer la disposition indiquée par la figure 8 (pl. 20). Les deux branches du tube renferment des boules situées à la même hauteur et qui sont à moitié pleines de mercure quand la pression exercée sur le mercure est égale à la pression de l'atmosphère; mais celle du tube à air est beaucoup plus petite que l'autre. Par cette disposition, le mercure ne commence à s'élever dans le tube qu'après avoir rempli la boule; c'est-à-dire qu'autant que la pression dépasse une certaine limite; cette boule a aussi pour objet de s'opposer à la sortie de l'air du tube par une diminution brusque de pression.

Le manomètre de M. Bunten (fig. 9, pl. 20) est disposé de la même manière.

783. M. Bunten a imaginé une manière très-commode de réunir les tubes de verre avec des tuyaux métalliques; les deux tuyaux doivent être à peu près du même diamètre et cannelés comme les extrémités du robinet (fig. 10 et 11, pl. 20); on les place bout à bout, recouverts de mastic rouge et enveloppés d'un tuyau de plomb d'un diamètre un peu plus grand; alors avec une pince on donne facilement au cylindre de plomb la forme des cannelures des bouts des tuyaux, et le joint devient parfaitement étanche quand le mastic a pris un peu de consistance.

784. On donne aussi aux manomètres à haute pression une disposition analogue à celle que nous avons indiquée précédemment pour les chaudières à basse pression, et qui est représentée dans les figures 12 et 13 (pl. 20). Le mercure est renfermé dans une cuvette en fonte, dans laquelle plonge la partie inférieure du tube de verre qui est fixé au moyen d'une boîte à étoupe. Cet appareil a le grand inconvénient de laisser facilement dégager de l'air dans la vapeur par un abaissement brusque de pression. L'appareil (fig. 14 et 15, pl. 20) est disposé pour éviter cet inconvénient; un tube vertical en fer est fixé à la partie inférieure de la cuvette, et le tube de verre y plonge jusqu'à une petite distance de la partie inférieure.

785. Dans tous ces appareils, la plus grande difficulté de la graduation réside dans l'influence de la variation de niveau du mercure dans les deux branches ou seulement dans la cuvette. On peut éviter complétement cette difficulté au moyen de la disposition indiquée par la figure 16 (pl. 20). Le tube *ab* est capillaire, horizontal, et à la hauteur du niveau du mercure dans la boule M. La boule N est destinée à empêcher l'air de se dégager par les diminutions brusques de pression. Pour graduer cet appareil, il suffit évidemment de diviser le tube *ab* en parties d'égale capacité à partir d'un certain point *a*; les divisions qui correspondent à la moitié, au tiers, au quart, au cinquième à partir du point *b*, seront évidemment celles que le mercure atteindra quand la force élastique de la vapeur sera de 2, 3, 4, 5 atmosphères. Mais, pour introduire le mercure dans l'appareil de manière que l'extrémité de la colonne de mercure se trouve au point *a* quand la pression qui s'exerce dans la boule M est celle de l'atmosphère, on ne peut pas employer la méthode ordinaire; il faut laisser le tube *ab* ouvert à l'extrémité *b*, verser

le mercure dans l'appareil jusqu'à ce que le tube *ab* étant horizontal, l'extrémité de la colonne soit au point convenable, et fermer alors brusquement le tube au point *b* au moyen d'un chalumeau.

786. Nous avons cru devoir décrire avec tous les détails nécessaires les différents manomètres à air qui sont employés ou qui peuvent l'être; mais nous devons dire que ces appareils sont d'un mauvais usage, qu'au bout de très-peu de temps ils sont mis hors de service par la diminution graduelle du volume d'air intérieur, par suite de l'oxydation du mercure. On reconnaît facilement qu'il y a eu absorption d'oxygène, et parce que les instruments indiquent, sous la pression de l'atmosphère, une pression plus grande, et parce que le mercure acquiert en peu de temps la faculté de mouiller le verre, ce qui indique qu'il tient de l'oxyde en dissolution. On a cru obvier à l'inconvénient dont il est question en introduisant une petite couche d'eau au-dessus du mercure; mais, par ce moyen, le métal s'oxyde encore plus facilement.

Le seul moyen d'éviter l'oxydation du mercure est d'employer, au lieu d'air, un gaz sans action sur le mercure : de l'hydrogène, de l'azote, ou de l'acide carbonique. La substitution de l'un de ces gaz à l'air, dans les différents appareils que nous avons décrits, ne présente de difficulté que pour le dernier (fig. 16, pl. 20). Pour remplir cet appareil d'acide carbonique, par exemple, on introduit ce gaz dans une vessie à robinet garnie d'un bouchon troué; après avoir rempli de mercure l'appareil, le tube *ab* étant ouvert, jusqu'à ce que la colonne s'arrête au point *a* lorsque le tube *ab* est horizontal, on incline le tube de manière que le mercure arrive en *b*; on introduit cette extrémité du tube dans le bouchon de la vessie, et on redresse le tube de manière que la colonne de mercure revienne en *a*; alors on dégage le tube de la vessie, et on le ferme à l'aide d'un chalumeau.

787. Les indications des manomètres à gaz devraient, à la rigueur, subir une correction relative à la température; mais comme, dans les circonstances les plus défavorables, en supposant une différence de température de 15° entre celle à laquelle la graduation a été faite et celle de l'observation, l'erreur n'excède pas $\frac{1}{90}$, on néglige cette correction, car dans aucun cas il n'est important de connaître la pression avec une plus grande précision.

788. Tous les manomètres à gaz, même quand ils ne renferment que

des gaz sans action sur le mercure et qu'ils sont disposés de manière à ne point laisser échapper de gaz, étant d'une construction difficile, délicate, d'une grande fragilité, et ayant une sensibilité variable, très-grande au commencement de l'échelle et très-petite à l'extrémité, on pourrait les remplacer avec avantage, quoique avec une plus grande dépense, par l'un des appareils suivants.

789. L'appareil figure 1re (pl. 21) est formé d'un tube de fer replié un grand nombre de fois sur lui-même; toutes les branches sont égales, parallèles, d'un même diamètre, et formées de plusieurs parties réunies par des écrous roulants fortement serrés; les faces voisines étant l'une plane, l'autre taillée en biseau, peuvent être facilement comprimées par l'écrou, de manière à former des joints parfaitement étanches. Le tube de fer se termine à une extrémité par un tube de verre *ab*, vertical et appliqué contre une échelle divisée; l'autre extrémité communique avec la partie supérieure de la chaudière. Toutes les parties inférieures des tubes sont remplies de mercure jusqu'à la ligne MN qui passe par leurs milieux. Le reste des tubes de fer est rempli d'eau. Le mercure a été introduit par les orifices $m$, $m'$, $m''$, etc., percés à la partie supérieure jusqu'à ce qu'il s'écoule par des orifices latéraux percés dans chacun d'eux à la hauteur de la ligne MN, et qu'on a fermés ensuite exactement avec des bouchons à vis fortement serrés. Le reste des tubes métalliques a ensuite été complétement rempli d'eau. Il est évident, d'après cette disposition, que si, par la pression de la vapeur dans la chaudière, le mercure s'abaisse d'une quantité $h$ dans le tube AB, il montera et descendra alternativement de la même quantité dans les suivants, et montera, par conséquent, de la même quantité $h$ dans le tube de verre *ab*; mais comme, dans l'appareil, il y a cinq paires de tubes communiquant par la partie inférieure, la pression de la vapeur sera $5.2h$ (13,59—1):13,59. Ainsi, la variation de hauteur du mercure dans le tube de verre *ab* sera à peu près 0,1 de la pression totale estimée en mercure; et, si les tubes avaient chacun $0^m,82$ de hauteur, l'appareil pourrait mesurer des pressions de cinq atmosphères, et les divisions de l'échelle correspondantes à des pressions successives de 1, 2, 3, 4, 5 atmosphères, seraient écartées de $0,1.0,76.13,59 : (13,59 - 1) = 0^m,082$. Il est évident qu'en augmentant la longueur des tubes ou leur nombre, ou à la fois l'un et l'autre, on pourrait mesurer des pres-

sions quelconques. Mais comme il est bien rare que la pression de la vapeur dépasse 5 atmosphères, les dimensions précédentes suffiront dans tous les cas. On pourrait se contenter de donner 1$^{c}$ de diamètre intérieur aux tubes de fer; dans ce cas, les tubes ayant à peu près 8 mètres de longueur, ils contiendraient environ 12 kilog. de mercure. On pourrait remplacer le tube de verre par un tube de fer et un flotteur dont l'extrémité libre, ou un contre-poids auquel il serait attaché, indiquerait la pression sur l'échelle.

790. Mais dans le cas où la pression de la vapeur ne doit pas excéder 4 à 5 atmosphères, il est plus simple et plus sûr d'employer un seul tube en fer recourbé. Dans le cas d'une pression de 5 atmosphères, en plaçant au-dessous du sol toute la partie du tube qui contient du mercure, celle qui devra être au-dessus sera seulement de 0,76.5:2 $=1^{m},90$; la longueur totale du tube sera d'environ 6 à 7 mètres, et le poids du mercure à peu près 12 kilog. pour un diamètre de $0^{m},01$. La figure 2 (pl. 21) représente la disposition de l'appareil; d'après ce qui précède, elle n'a pas besoin d'explications; nous dirons seulement que le réservoir M, dans lequel l'eau sera toujours sensiblement à la même hauteur, est destiné à éviter l'erreur qui pourrait résulter de la variation de longueur de la colonne d'eau.

On pourrait même diminuer de beaucoup la quantité de mercure employée, en donnant au tube en communication avec la chaudière un très-petit diamètre, et à l'autre tube un diamètre suffisant, pour que le flotteur pût s'y mouvoir facilement. A la vérité, cette économie du mercure aurait lieu aux dépens de la sensibilité de l'appareil; mais quand la course du flotteur serait réduite à $\frac{1}{4}$ de ce qu'elle est dans un manomètre d'un diamètre constant, c'est-à-dire, à peu près à 10 centimètres par atmosphère, il n'en résulterait aucun inconvénient dans la pratique. M. Boigues, rue Neuve des Mathurins, n° 27, construit des manomètres ainsi disposés, qui ne reviennent qu'à 100 francs, pour des pressions de six atmosphères; le diamètre du tube communiquant avec la chaudière est de $0,^{m}005$; celui de l'autre tube est à peu près de $0^{m},015$.

791. On pourrait aussi employer un long tube de verre placé sur l'échelle; cette disposition serait plus simple; on pourrait alors recourber le tube à son extrémité, de manière à faire écouler le mercure dans un

réservoir latéral lorsque la pression serait trop grande dans la chaudière. La figure 3 (pl. 21) représente cette disposition.

792. En résumé, pour les chaudières à basse pression, quand il n'est pas nécessaire d'avoir une mesure bien exacte de la pression, l'appareil figures 9 et 10 (pl. 9) doit être préféré; mais si on veut mesurer exactement la pression et avoir un appareil qui puisse servir en même temps de soupape de sûreté, il vaut mieux employer celui qui est représenté dans les figures 12 et 13 (pl. 19). Enfin, pour les chaudières à haute pression, quand la pression ne dépasse pas 5 à 6 atmosphères en sus de la pression de l'air, il faut renoncer aux manomètres à air, à cause de leur fragilité, des nombreuses causes d'erreur qu'on y rencontre, de leur complication, et adopter le manomètre à pression directe représenté figure 2 ou figure 3 (pl. 21).

## § 4. — SOUPAPES DE SURETÉ.

793. Les soupapes de sûreté sont des bouchons coniques ou cylindriques, engagés dans des douilles de même forme, et qui sont pressés par des poids équivalents à la pression exercée sur la face inférieure par la vapeur à la limite qui ne doit point être dépassée. Quand la vapeur a acquis cette tension, la soupape se soulève, et la vapeur s'échappant ne peut pas acquérir une plus grande force élastique.

794. Dans la construction des soupapes il faut déterminer trois choses, la grandeur des ouvertures, la charge des soupapes, et la disposition la plus avantageuse; nous y ajouterons des observations importantes sur un phénomène singulier qu'elles présentent dans certaines circonstances.

### *Détermination du diamètre des ouvertures.*

795. Les ouvertures doivent être évidemment telles, que seules elles puissent faire écouler toute la vapeur qui peut se former. La quantité de vapeur qui se forme ordinairement dans les chaudières est, comme nous l'avons déjà dit, de 15 à 20 kilogrammes par heure, et par mètre carré de surface exposée au feu; mais comme les soupapes doivent principalement servir dans le cas où le feu aurait été augmenté d'une manière extraordinaire, il faut compter sur 100 kilogrammes par heure et par

mètre carré de surface de chauffe, nombre qui, comme nous l'avons vu, est le maximum de la quantité de vapeur qui puisse être produite.

796. Connaissant le poids de la vapeur qui doit s'écouler dans une seconde, la détermination de la grandeur de l'ouverture ne dépend plus que de la densité de la vapeur et de la vitesse avec laquelle elle s'échappera.

Il est extrêmement probable que la vapeur s'écoule des vases dans lesquels elle se produit suivant les mêmes lois que les gaz des vases dans lesquels ils sont comprimés. Cette vérification a d'ailleurs été faite par plusieurs physiciens, et notamment par M. Christian. Les résultats de l'observation se sont accordés avec ceux du calcul, en admettant un coefficient de contraction compris entre 0,72 et 0,80. Alors, en désignant par $v$ la vitesse d'écoulement de la vapeur sous la pression qui ne doit pas être dépassée, par V le volume de vapeur qui doit s'écouler par seconde, et enfin par $s$ la surface de l'orifice de la soupape de sûreté, on aura évidemment $sv = V$, et par suite $s = V : v$. Le volume V se déduira facilement du poids correspondant, au moyen de la densité calculée par la formule (49). Quant à la vitesse d'écoulement, on la trouvera dans la table suivante :

*Vitesse d'écoulement de la vapeur sortant dans l'air sous différentes pressions.*

| Pression. | | Vitesse par seconde. |
|---|---|---|
| 1 | atmosphère $\frac{1}{4}$ | 266 |
| 1 | « $\frac{1}{2}$ | 352 |
| 1 | « $\frac{3}{4}$ | 395 |
| 2 | « | 428 |
| 3 | « | 502 |
| 4 | « | 537 |
| 5 | « | 559 |
| 6 | « | 574 |
| 8 | « | 595 |
| 10 | « | 607 |
| 12 | « | 618 |
| 14 | « | 625 |
| 16 | « | 631 |
| 18 | « | 635 |
| 20 | « | 639 |

797. Supposons, par exemple, que la vapeur se produise sous la pression de deux atmosphères, dans une chaudière ayant 10 mètres carrés de

surface de chauffe; la quantité de vapeur produite par heure sera à peu près de $20^k \times 10 = 200^k$. Mais nous la supposerons de $1000^k$, et par seconde de $0^k,277$.

La densité de la vapeur à 2 atmosphères étant de 0,0011, le volume de vapeur à évacuer par seconde sera de 0,277 : 0,0011 = 250 litres. Ainsi on aura $V = 0^m,250$; $v = 428$, et par conséquent $s = 0,250 : 428 = 0,000578$.

Ainsi, pour donner une issue suffisante à la vapeur, il faudra que l'ouverture de la soupape ait à peu près 6 centimètres carrés. Cette ouverture est très-petite à cause de l'énorme vitesse avec laquelle la vapeur s'écoule. Il faudrait bien se garder cependant de ne donner à la soupape que la section trouvée par le calcul, 1° parce que les vapeurs, en sortant des orifices percés en minces parois, éprouvent comme les liquides et les gaz une contraction qui diminue la dépense; 2° parce que, dans certaines circonstances, il pourrait se former, par des causes que nous ne connaissons pas, une quantité de vapeur plus considérable que celle que nous avons admise. Il est toujours prudent de donner à l'ouverture une surface au moins deux ou trois fois plus grande que celle qui est rigoureusement nécessaire, ou du moins de placer sur les chaudières plusieurs soupapes ayant chacune l'ouverture nécessaire pour laisser dégager toute la vapeur qui pourrait se produire, en admettant une formation de 100 kilogrammes par mètre carré et par heure.

798. Cherchons maintenant une formule générale au moyen de laquelle nous puissions facilement calculer le minimum de section d'une soupape de sûreté dans chaque cas particulier.

Désignons par S la surface de chauffe en mètres carrés, par $s$ la surface de l'orifice de sortie de la vapeur, par $n$ la force élastique de la vapeur exprimée en atmosphère, et par $d$ sa densité. Le maximum de poids de vapeur qui pourra se produire dans une seconde, sera, d'après ce qui précède,

$$\frac{100 \times S}{3600} = 0^k,028.S.$$

La formule $P = Vd$, dans laquelle P représente le poids d'un corps, V son volume, et $d$ sa densité, donne le volume au moyen du poids et de la densité; mais comme l'unité de volume est le volume de l'eau qui pèse l'unité de poids, lorsque P est donné en kilogrammes, l'unité de volume

est le décimètre cube ; ainsi le volume de la vapeur sera

$$\frac{0{,}028.S}{d},$$

en décimètres cubes, ou $0{,}000028 \times S : d$ en mètres cubes.

La hauteur d'une colonne de vapeur, équivalente à la pression d'une atmosphère, étant $0{,}76 \times 13{,}59 \times \frac{1}{d} = 10{,}33 : d$, la hauteur génératrice de la vitesse d'écoulement sera

$$\frac{(n-1)10{,}33}{d},$$

et la vitesse sera donnée par la formule

$$v = \sqrt{\frac{19{,}62.10{,}33(n-1)}{d}} = \sqrt{202{,}67\frac{n-1}{d}} = 14{,}23\sqrt{\frac{n-1}{d}},$$

et nous aurons

$$14{,}33\sqrt{\frac{n-1}{d}}.s = \frac{0{,}000028S}{d},$$

d'où

$$s = \frac{0{,}000028S}{14{,}33.d}\sqrt{\frac{d}{n-1}} = 0{,}000002\frac{S}{d}\sqrt{\frac{d}{n-1}}.$$

Si $s$ était estimée en centimètres carrés, la formule serait

$$s = 0{,}02.\frac{S}{d}\sqrt{\frac{d}{n-1}}\cdots \qquad (1)$$

799. La formule renfermée dans l'ordonnance du 29 septembre 1823 est

$$D = 1{,}3\sqrt{\frac{S}{n-0{,}412}}\cdots \qquad (2)$$

dans laquelle D représente le diamètre de l'orifice de la soupape. Cette formule donne

$$s = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4}(1{,}3)^2.\frac{S}{n-0{,}422} = 1{,}32.\frac{S}{n-0{,}412} = 1{,}32.\frac{S}{n-0{,}412}\cdots \qquad (3)$$

En supposant $S = 10$, et $n = 2$, on trouve par la formule (1)

$$s = 0{,}02.\frac{10}{0{,}0011}\sqrt{\frac{0{,}0011}{1}} = 181{,}81.0{,}033 = 5^{c},97.$$

La formule (3) donne

$$s = 1{,}32.\frac{10}{1{,}588} = 8^{c},35.$$

En supposant $n = 10$, $d = 0{,}0047$, la formule (1) donne $s = 1^c$, et la formule (3) $s = 1^c{,}4$.

Le rapport des sections est à peu près celui de 1 à 1,4, et on obtiendrait sensiblement les mêmes résultats, en supposant dans la formule (1) un coefficient de contraction représenté par 0,70, ce qui augmenterait la section dans le rapport de 1 à 0,70, ou de 1,4 à 1. Désormais nous nous servirons de la formule légale, et nous supposerons toujours que les chaudières sont pourvues de deux soupapes de même grandeur, comme l'ordonnance l'exige.

800. *Effet produit par les soupapes d'un trop petit diamètre.* Si l'ouverture d'une soupape était trop petite pour dépenser la quantité de vapeur qui se forme à une tension donnée, la force élastique de la vapeur augmenterait, mais non pas indéfiniment; elle atteindrait bientôt une certaine limite qu'elle ne pourrait pas dépasser. En effet, à mesure que la température de la vapeur augmentera, sa densité, la vitesse d'écoulement et la dépense augmenteront en même temps, tandis que la quantité de vapeur formée restera constante; ainsi, il arrivera nécessairement un instant où la dépense sera égale à la quantité de vapeur qui peut se former d'après l'activité du foyer et l'étendue de la surface de chauffe; à cet instant la température de la vapeur restera évidemment constante. Dans tous les cas, la limite extrême serait celle correspondante à la dépense de $100^k$ de vapeur par heure, et par mètre carré de surface de chauffe.

801. Ce fait a été vérifié par M. Christian. Il s'est servi pour cela d'une chaudière de fonte épaisse, fermée par un couvercle de même métal maintenu par des boulons : elle fut placée dans un fourneau et chauffée par un feu très-violent, car la cheminée de tôle rougissait à près de 4 décimètres de hauteur. Le couvercle était percé de trois ouvertures : l'une recevait un thermomètre, une autre le fil d'un flotteur qui permettait de mesurer le niveau de l'eau, et la dernière était destinée à recevoir une plaque percée de différentes ouvertures par lesquelles la vapeur s'échappait.

La surface de chauffe était de 18,9382 décimètres carrés, et le volume d'eau de 10 litres.

Le feu étant maintenu à la même intensité, un litre d'eau a été éva-

poré en trois minutes, quelle que fût d'ailleurs l'étendue de la surface libre par laquelle la vapeur se dégageait.

| | |
|---|---|
| Quand l'orifice était de 36 millimètres carrés, la température était de | 105°,5 |
| Quand l'orifice était de 18 millimètres carrés, la température était de | 115° |
| Quand l'orifice était de 9 millimètres carrés, la température était de | 138° |
| Ouverture circulaire de 25 millimètres de diamètre | 100° |
| » » de 12,5 » » | 101° |
| » » de 6,25 » » | 112° |
| Chaudière ouverte | 100° |

Ces expériences confirment, en outre, le fait que nous avons énoncé sur le maximum de vapeur que peut produire 1 mètre carré de surface de chauffe dans une heure; car la surface de chauffe étant de 18,9382 décimètres carrés, le feu le plus violent n'a pu produire que 1 kilogramme de vapeur en trois minutes, ce qui revient à peu près à 100 kilogrammes par mètre carré, et par heure.

Elles confirment aussi ce que nous avons énoncé précédemment, que la même étendue de surface de chauffe, dans les mêmes circonstances, produit le même poids de vapeur, quelle que soit d'ailleurs sa tension; et que le même poids de vapeur renferme toujours la même quantité de chaleur à toutes les tensions.

*Détermination du poids des soupapes.*

802. La charge d'une soupape, augmentée de la pression de l'atmosphère, doit évidemment être égale à la pression que la vapeur exercera en sens contraire sur cette soupape, à la température qui ne doit point être dépassée; or, la pression de la vapeur est égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base l'étendue de l'orifice, et pour hauteur autant de fois $0^m,76$ que la force élastique de la vapeur renferme d'atmosphères; il est par conséquent très-facile de trouver dans chaque cas particulier le poids total de la soupape.

803. Par exemple, si la soupape avait un centimètre carré, et si la limite de pression était de deux atmosphères, le poids de la soupape devrait résister seulement à une atmosphère, et par conséquent être égal au poids d'une colonne de mercure qui aurait un centimètre carré de base et $0^m$, 76 de hauteur; cette colonne aurait $76^c$ cubes, et comme la densité du mercure est de 13,568, et qu'un centimètre cube d'eau pèse 1 gramme, le poids total de cette colonne serait de $76 \times 13{,}568 = 1031^g{,}168 = 1^k{,}031$.

Ainsi, pour avoir le poids d'une soupape, il faudra multiplier le poids $1^k{,}031$ par le nombre d'atmosphères moins une de la vapeur, et par le nombre de centimètres carrés de l'ouverture.

Par exemple, si la pression devait être de 3 atmosphères $\frac{1}{2}$, et si la soupape avait 4 centimètres de diamètre, sa surface serait de $12^{cc}{,}57$; par conséquent, le poids de la soupape devrait être de $1^k{,}031 \times 2{,}5 \times 12{,}57 = 32^k{,}30$.

804. La vapeur présente à sa sortie par les ouvertures des soupapes de sûreté ou par les tuyaux d'écoulement, un phénomène fort singulier : la température de la vapeur un peu au delà de l'orifice est d'autant moins élevée, que la tension et la température de la vapeur dans la chaudière sont plus considérables; ainsi, on ne peut pas tenir la main dans un jet de vapeur à $100^o$ qui sort par un orifice percé dans une chaudière, tandis qu'un courant de vapeur à plusieurs atmosphères ne fait éprouver qu'une sensation de chaleur très-supportable. Ce phénomène, qui paraît paradoxal, est une suite nécessaire de la dilatation que la vapeur éprouve à sa sortie dans l'air, dilatation qui est d'autant plus grande que la tension de la vapeur dans la chaudière est plus forte, et qui est nécessairement accompagnée d'un grand abaissement de température.

Ce phénomène avait été observé depuis longtemps par tous les physiciens qui ont employé les marmites de Papin; il a été confirmé par M. Perkins et par Clément.

### *Formes des soupapes de sûreté.*

805. Les soupapes de sûreté sont, comme nous l'avons déjà dit, des bouchons cylindriques ou coniques, placés dans des tubulures de même forme. Dans le premier cas, les cylindres sont terminés par un rebord étroit, qui s'appuie sur les bords de l'ouverture de la tubulure, et pour

qu'ils ne soient pas projetés au loin lorsqu'ils sont soulevés, ces cylindres sont creux, ouverts en bas et percés à la circonférence de plusieurs larges ouvertures, qui permettent à la vapeur de s'écouler latéralement; ils ont un diamètre un peu plus petit que celui des tubulures dans lesquelles ils sont engagés; par cette disposition, leurs mouvements ont lieu dans la direction de leur axe. Les cylindres des soupapes sont quelquefois creusés extérieurement, de manière à former trois nervures, qui ont un axe commun. Quand les soupapes sont coniques, elles sont garnies à la partie inférieure d'une tige d'un petit diamètre, qui passe dans un ou plusieurs anneaux fixes, qui servent de guides à la soupape dans ses mouvements. Dans tous les cas, les surfaces en contact avec les bords supérieurs de la tubulure ont toujours une petite étendue.

Il est utile de ménager, au-dessus du chapeau des soupapes, une partie carrée, au moyen de laquelle on puisse facilement les roder sur leur siége, lorsqu'elles laissent dégager la vapeur, par suite de l'oxydation des surfaces en contact, ou de l'interposition de matières étrangères entraînées par la vapeur.

806. Avant de décrire les différentes formes de soupapes de sûreté, nous parlerons d'un phénomène fort singulier qu'elles produisent, et qui peut avoir une grande influence sur leur efficacité.

Le fait dont il est question a été observé, pour la première fois, par M. Griffith, ingénieur des mines de Fourchambault. Voici en quoi il consiste : Si de l'air fortement comprimé dans un réservoir s'échappe par une ouverture pratiquée dans une large surface plane, et que l'on présente au courant une planche ou un disque métallique d'un diamètre beaucoup plus grand que celui de la veine, ce corps, repoussé d'abord par la pression de la veine d'air, est au contraire attiré lorsqu'en surmontant cette répulsion il a été approché à une petite distance du plan de l'orifice. Le disque ne peut alors être éloigné que par une force plus ou moins considérable.

Depuis, on a reconnu que les mêmes phénomènes ont lieu dans l'écoulement de l'air et de l'eau. L'effet dont il est question provient de ce fait général dans l'écoulement de tous les fluides : lorsqu'une veine qui sort d'un tube s'épanouit dans un tuyau dont le diamètre augmente progressivement, l'accroissement de section est toujours accompagné

d'une diminution de pression contre la surface intérieure du tuyau, diminution qui peut rendre la pression intérieure plus petite que la pression extérieure. Dans l'expérience de M. Griffith, la veine d'air s'épanouissait évidemment dans un canal dont la section était la surface d'un cylindre, ayant pour hauteur la distance des deux plaques, et pour base les cercles concentriques à celui de l'orifice.

La diminution de pression dans un orifice évasé, disposé d'une manière quelconque, peut être constatée en plaçant contre la surface des manomètres qui communiquent à l'intérieur et à l'extérieur. Pour l'air, on peut la constater en plaçant un entonnoir de papier à l'extrémité d'un soufflet d'appartement; l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure l'écrase quand le papier n'est pas trop résistant.

807. Ces expériences ont d'abord fait regarder les soupapes de sûreté comme ne présentant aucune garantie contre un excès de pression. Mais en ne donnant qu'une très-petite largeur à la surface qui est en contact avec leur siége, quand elles sont cylindriques, ou qu'une très-petite largeur à la projection du cône tronqué, qui forme leurs surfaces extérieures, quand elles sont coniques, les soupapes de sûreté se soulèvent toujours sous des pressions peu différentes de celles qui correspondent à leurs charges.

En effet, désignons par S la surface de la soupape pressée par la vapeur, par $s$ la surface en contact avec le siége, par $p$ la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface, et enfin par $n$ le nombre d'atmosphères de la vapeur. La charge P de la soupape sera égale à $p(n-1)S$. Si nous supposons que la soupape ne touche le siége que par un très-petit nombre de points, une couche d'air très-mince couvrira presque toute la surface $s$; et quand la soupape se trouvera soulevée d'une quantité très-petite, en supposant que la pression de la vapeur sous le rebord de la soupape soit complétement nulle, la pression exercée sur la soupape sera $p(n-1)S+ps$; ainsi, pour la soulever complétement, la tension de la vapeur dans la chaudière devrait augmenter d'un nombre d'atmosphères représenté par $s : S$, et par conséquent d'une fraction d'atmosphère d'autant plus petite, que le rapport de $s$ à S sera plus petit. Or, dans les dispositions ordinaires, $s : S$ est plus petit que 0,1; ainsi, l'influence du phénomène dont il est question est très-faible, d'autant plus que les suppositions que nous avons faites sont les plus

défavorables et ne peuvent jamais se réaliser, car la surface *s* touche toujours le siége sur une étendue plus ou moins considérable, et la vapeur, en s'écoulant, exerce toujours une certaine pression contre les bords de la soupape.

Mais il n'en est ainsi qu'à la condition que *s* soit très-petit par rapport à S, car, si le contraire avait lieu, l'accroissement de pression nécessaire pour soulever entièrement la soupape, pourrait être très-considérable.

808. Les soupapes de sûreté peuvent se diviser en deux classes, celles qui sont chargées directement par un poids, et celles dans lesquelles la charge a lieu par l'intermédiaire d'un levier.

809. *Soupapes chargées directement.* Les figures 4 et 5 (pl. 21) représentent, la première, une coupe verticale, la seconde, une projection horizontale d'une soupape de sûreté à charge directe, disposée de la manière la plus simple. AB est la surface supérieure de la chaudière; CD une tubulure en fonte boulonnée sur la chaudière; G et H deux tiges verticales fixées sur le rebord supérieur de la tubulure; IK une tige horizontale percée d'un orifice en son milieu et qui relie les deux tiges G et H; P, la soupape de sûreté; sur sa tête est fixée la tige L, autour de laquelle sont posés les poids annulaires M, pourvus dans la direction d'un rayon d'une fente qui permet de les mettre en place sans démonter la traverse IK. La soupape est en cuivre, et la partie qui s'engage dans la tubulure est cylindrique, sensiblement du même diamètre, et percée de quatre ou cinq ouvertures rectangulaires pour donner issue à la vapeur. Ordinairement on fixe, par le choc, sur le bord supérieur de la tubulure, et dans la fonte, un anneau de bronze qui dépasse un peu le plan EF, auquel on donne intérieurement le diamètre de la tubulure, et que l'on rend parfaitement plan sur la face libre qui doit former le siége de la soupape, et on rode la soupape sur son siége en introduisant entre eux une petite quantité d'émeril très-fin.

810. Les figures 6 et 7 (pl. 21) présentent une disposition analogue; seulement, la soupape est conique et son siége est formé par une douille en cuivre fixée dans la tubulure en fonte; elle est guidée dans son mouvement par une tige *mn* fixée à sa partie inférieure, et engagée dans un anneau qui fait partie de la douille de cuivre.

811. Les figures 8 et 9 (pl. 21) représentent deux soupapes de sûreté qui

sont chargées par des poids placés dans l'intérieur même des chaudières; pour la seconde, on introduit le poids par le trou d'homme.

812. Les figures 10 et 11 représentent une disposition de soupape analogue à celle des figures 4 et 5. La charge, composée de grenaille de plomb, est placée dans une boîte M, qui est guidée dans son mouvement par deux traverses qui passent à travers deux montants fixes. Dans toutes les dispositions que nous venons de décrire, la vapeur, en sortant par la soupape, se dégage librement dans l'air. Dans les appareils suivants la vapeur est conduite hors de l'atelier par un tuyau. Ces appareils sont principalement destinés à évacuer la vapeur à la fin du travail.

813. Dans la figure 12 (pl. 21) la soupape et la charge sont renfermées dans une boîte en fonte boulonnée sur la chaudière, et garnie d'une tubulure destinée à conduire la vapeur au dehors; la tige de la soupape traverse librement la paroi supérieure de la boîte, et elle est suspendue à un levier destiné à faire mouvoir la soupape. Les figures *a* et *b* représentent une coupe et une projection de la pièce en cuivre, fixée par pression dans la fonte, et qui sert à la fois de guide et de siége à la soupape.

814. Les figures 14 et 15 représentent un appareil analogue; seulement, pour éviter la perte de vapeur par l'espace libre qui existe nécessairement dans l'appareil précédent, entre la partie supérieure de la tige de la soupape et les bords de l'orifice percé dans la paroi supérieure de la boîte, cette tige passe à travers une boîte à étoupe, et la pression a lieu à l'aide d'un levier.

815. La soupape de Maudslay, figures 1, 2, 3 et 4 (pl. 22), ne diffère des précédentes qu'en ce qu'une partie du poids qui charge la soupape est en dehors de la boîte. La tige de la soupape est dirigée par une douille en cuivre fixée par pression dans la fonte. Le poids supérieur est supporté par quatre petits appendices de la tige; mais comme il est percé de quatre ouvertures correspondantes, en le tournant de manière que ces ouvertures soient en regard des appendices de la tige, le poids descend sur la face supérieure de la boîte, et la soupape n'est plus chargée que par le poids intérieur.

816. La soupape de sûreté employée en Belgique est représentée figure 5 (pl. 22); elle est garnie d'une tige triangulaire et repose sur un siége à arêtes vives. La soupape et le poids qui produit la charge sont

placés dans une boîte en fonte fermée, afin que l'on ne puisse pas augmenter la charge; cette boîte est garnie de plusieurs orifices par lesquels la vapeur se dégage quand la soupape est ouverte. La tige autour de laquelle les poids sont placés, est terminée par une chaîne fixée à un levier qui sert à soulever la soupape.

817. *Soupape à ressort.* Au lieu de poids on emploie quelquefois des ressorts qui agissent directement sur la soupape. On peut même alors disposer l'appareil de manière qu'il indique la pression de la vapeur. Dans ce cas, l'appareil se compose d'un cylindre alésé, renfermant un piston surmonté d'un ressort à boudin qui s'appuie sur le couvercle du cylindre. Le piston est garni d'une tige qui sort du cylindre à travers une boîte à étoupe. En faisant communiquer la partie inférieure avec une chaudière à vapeur, l'extrémité de la tige pourra marquer sur une échelle, directement ou par l'intermédiaire d'un mécanisme convenable, la tension de la vapeur. La tige du piston pourrait même ouvrir une soupape de décharge lorsque celui-ci aurait atteint une certaine hauteur. Les variations de résistance que peuvent présenter le mouvement du piston et celui du ressort ne permettent pas d'employer ces appareils avec sécurité.

818. La figure 6 (pl. 22) représente une soupape à ressort employée dans les générateurs des locomotives. Le ressort est composé de douze lames d'acier alternativement courbées en sens contraire, dont les extrémités sont fixées dans deux montants *ab* et *cd*; une traverse *mn* qui s'appuie sur le système des ressorts sert à fixer la pression exercée sur la soupape.

819. *Soupape chargée par l'intermédiaire d'un levier.* La figure 16 (pl. 21) représente la disposition la plus simple de cet appareil. Le levier *mn* qui s'appuie sur la tête de la soupape est mobile autour du point *o*. *rs* est une fourchette qui sert à guider le levier dans son mouvement. Il est évident que la charge de la soupape est égale au poids M multiplié par le rapport de *on* à *om*; mais il faut ajouter à ce poids celui du levier lui-même; en désignant ce poids par P, par *l* la distance de son centre de gravité *p* au point *o*, distance que l'on déterminera par tâtonnement en suspendant le levier entre deux pointes jusqu'à ce qu'il reste en équilibre, l'effet du poids du levier sera évidemment égal au produit P*l* divisé par la distance *om*.

820. La figure 16 (pl. 22) représente une disposition de soupape de

sûreté des générateurs des locomotives. La soupape est pressée par un ressort et un levier. La tige *mn* est fixée au point *n* à la chaudière, et on fait varier la tension du ressort au moyen de l'écrou *p*.

Les figures 14 et 15 (pl. 22) représentent une autre manière de disposer la soupape de sûreté et la tige fixée au levier qui presse la soupape.

821. Les appareils figures 12 et 13 (pl. 22) sont destinés à établir ou à intercepter la communication de la chaudière sur laquelle ils sont montés, avec un tuyau qui conduit la vapeur de plusieurs chaudières au lieu où elle doit être employée ou comme force motrice, ou comme moyen de chauffage.

822. M. Chaussenot a fait récemment aux soupapes de sûreté un perfectionnement très-important. Cette nouvelle disposition est représentée figure 17 (pl. 22). Le centre de rotation du levier est exactement dans le plan de contact de la soupape et de son siége; par cette circonstance la soupape se soulève parallèlement à elle-même. La tige fixée au levier qui appuie à la partie inférieure de la cavité conique percée dans la soupape, peut être placée exactement dans la position convenable au moyen d'un jeu suffisant dans l'orifice du levier, à travers lequel elle passe, et de l'écrou qui la fixe; alors cette tige ne pouvant pas se déranger, et agissant toujours sur le même point de la soupape, celle-ci reprend toujours exactement la même position, et on a pu ne donner qu'environ 1 millim. de largeur aux bords inférieurs de la soupape ainsi qu'à la pièce fixe sur laquelle elle s'appuie; alors il ne peut point y avoir d'adhérence sensible entre la soupape et son siége, et la soupape se lève exactement à la pression pour laquelle elle a été calculée. Je regarde cette disposition comme bien préférable à toutes les autres. J'ai vu ces soupapes fonctionner avec toute la précision qu'on devait attendre de leur bonne disposition.

823. Les figures 7, 8 et 9 (pl. 22) présentent une élévation, une coupe et une projection horizontale d'un appareil qui porte en même temps une plaque fusible et une soupape de sûreté. La plaque fusible *mn* est maintenue par une plaque de fonte à jour boulonnée sur les bords de la tubulure.

824. Les figures 10 et 11 (pl. 22) représentent un appareil qui renferme, comme le précédent, une soupape de sûreté et une plaque fusible, mais qui est disposé de manière que l'écoulement de la vapeur puisse être

arrêté quand la rondelle a été fondue par une trop grande élévation de température, et que l'on puisse remettre une plaque fusible sans être obligé d'interrompre le travail.

825. Dans les figures 1, 2 et 3 (pl. 23), on a représenté des appareils très-fréquemment employés. Sur une même douille fixée à la chaudière se trouvent la soupape de sûreté, la plaque fusible et l'appareil à flotteur pour reconnaître le niveau de l'eau dans la chaudière.

826. La figure 4 (pl. 23) représente un appareil de M. Hall, qui renferme le flotteur, la soupape de sûreté, une plaque fusible avec une soupape pour arrêter l'écoulement de la vapeur quand la plaque fusible est fondue, et une disposition pour régler l'alimentation. Les figures 5 et 6 représentent les détails de la boîte de fonte sur une plus grande échelle. La disposition relative à l'alimentation exige seule une explication. L'eau d'alimentation, poussée par une pompe, passe par le tuyau *abc* (fig. 6) qui traverse le corps de pompe ABCD; dans ce corps de pompe se trouve un piston creux *mn* fixé à une tige *pq* qui, après avoir traversé une boîte à étoupe, vient s'articuler au balancier du flotteur; par cette disposition, le piston forme un registre qui fait varier la quantité d'eau d'alimentation suivant la hauteur du niveau de l'eau dans la chaudière.

827. Dans les générateurs des locomotives, on emploie des sifflets à vapeur destinés à donner différents signaux. Ils sont construits sur le même principe que les sifflets ordinaires; une lame de vapeur est dirigée contre un biseau aigu. Mais, pour rendre le son plus fort, au lieu de donner à la lame de vapeur une petite largeur, on lui donne la forme d'une surface cylindrique d'un grand diamètre, et on place au-dessus une calotte métallique dont les bords taillés en biseau appartiennent à un cercle de même diamètre que celui du cylindre de vapeur; la calotte est elle-même un timbre qui, par sa résonnance, augmente l'effet produit. La figure 18 (pl. 22) représente un sifflet à vapeur; le tuyau AB, garni d'un robinet, communique avec la chaudière; quand il est ouvert, la vapeur s'écoule par la fente annulaire *ab*, et le courant vient se briser contre le biseau annullaire *cd*.

828. M. Sorel a imaginé une nouvelle soupape de sûreté à sifflet. Les figures 7 et 8 (pl. 23) représentent la disposition de cet appareil; il est formé d'une soupape ordinaire dont les bords jouent dans un canal an-

nulaire qui dirige la vapeur dans une fente de même forme placée au-dessous du timbre.

829. La figure 9 (pl. 23) représente un appareil complet de M. Sorel, qui renferme le niveau d'eau, la soupape de sûreté et la plaque fusible. Le levier du niveau d'eau porte une fourchette qui embrasse le levier de la soupape, de manière à la soulever lorsque le niveau est descendu au-dessous d'une certaine limite; alors la vapeur s'échappe en produisant un grand bruit qui avertit le chauffeur.

830. *Soupapes qui se soulèvent à une température donnée de la vapeur.* Les soupapes ordinaires, surtout celles qui sont pourvues d'un large rebord, ayant la propriété d'adhérer à leurs siéges, on a eu l'idée de faire lever les soupapes à une limite donnée de température, en employant pour cela la force de dilatation des métaux. Mais ces appareils sont compliqués; ils exigent, dans tous les détails de leur construction, une précision à laquelle il est difficile d'arriver; aussi on y a renoncé. Pour donner une idée de la manière dont ils pourraient être disposés, imaginons qu'au-dessous de la tubulure d'une soupape ordinaire on ait placé un tuyau en fer, vertical, fermé par la partie inférieure et renfermant un cylindre d'un métal plus dilatable fixé au fond du tuyau de fer, pouvant facilement s'allonger et se raccourcir dans ce tuyau, et dont la longueur soit telle, qu'à la limite de température assignée, le cylindre vienne s'appuyer sur la soupape; à une température plus élevée, il la lèvera nécessairement.

831. Dans les chaudières à basse pression, on emploie quelquefois, au lieu de soupape de sûreté, un tube ouvert par les deux bouts, qui plonge dans l'eau de la chaudière de quelques centimètres au-dessous du niveau habituel, et qui s'élève à une hauteur telle, que la colonne d'eau qu'il renferme, augmentée de la pression atmosphérique, excède la pression sous laquelle la vapeur doit se former. Si la pression dépassait la limite correspondante à la hauteur du tube, la chaudière se viderait jusqu'à la hauteur de l'extrémité inférieure du tube, et ensuite la vapeur sortirait librement; et si le niveau de l'eau dans la chaudière descendait au-dessous du même orifice, la vapeur se dégagerait évidemment par le tube. Cet appareil pourrait servir de manomètre à eau; il serait d'un service très-commode pour les chaudières qui fonctionnent à une pression réelle plus petite qu'une atmosphère $\frac{1}{2}$.

832. *Soupapes de sûreté contre un excès de pression extérieure.* Lorsque, par une trop grande injection d'eau froide d'alimentation dans une chaudière, ou seulement par son refroidissement, la tension de la vapeur s'abaisse au-dessous de la pression de l'atmosphère, la chaudière peut être écrasée par l'excès de la pression extérieure. Pour éviter cet accident, qui n'est réellement à craindre que pour les chaudières à basse pression, à cause de leur forme et de la petite épaisseur du métal, on place sur les chaudières, et ordinairement sur la plaque qui ferme le trou d'homme, une soupape qui s'ouvre lorsque la pression intérieure est au-dessous de celle de l'atmosphère (fig. 10 et 11, pl. 16).

## § 5. — THERMOMÈTRES, PLAQUES FUSIBLES, PLAQUES ÉLASTIQUES.

833. *Thermomètres.* Jusqu'ici on n'a point adapté de thermomètres aux chaudières à vapeur, du moins l'usage n'en est point général. Cependant ces instruments pourraient servir à indiquer non-seulement les températures, mais encore les pressions de la vapeur saturée, puisque l'on a des tables suffisamment exactes qui donnent les pressions correspondantes aux différentes températures. A la vérité, pour les grandes pressions, les indications du thermomètre auraient peu de précision, car alors une petite variation de température correspond à une grande variation de pression; mais quand les pressions ne s'élèvent qu'à un petit nombre d'atmosphères, les indications peuvent être suffisantes pour diriger le travail d'une chaudière. L'échelle devrait porter d'un côté les températures, et de l'autre les pressions.

834. Mais le réservoir du thermomètre ne devrait pas être exposé librement dans l'intérieur de la chaudière, à cause de la pression qui diminuerait le volume du réservoir et qui élèverait le mercure dans le tube à une hauteur plus grande que celle qui correspond à la température. Le thermomètre devrait être plongé dans un cylindre de fer rempli d'huile ou de mercure, dont les bords seraient fixés sur un orifice percé dans la partie supérieure de la chaudière.

835. En employant des thermomètres ouverts à leur partie supérieure, on pourrait les faire en métal et les garnir d'un flotteur et d'un indicateur, comme les manomètres à mercure; il serait facile de leur

donner des dimensions suffisantes pour que les espaces parcourus par l'indicateur, pour les pressions ordinaires, fussent assez considérables. A la vérité, une partie du mercure pourrait se volatiliser; mais le tube étant rétréci supérieurement de manière que l'air ne s'y renouvelle pas, et la température n'étant jamais élevée jusqu'à l'ébullition du mercure, l'évaporation serait peu sensible : d'ailleurs rien ne serait plus facile que de l'éviter complétement, en refroidissant continuellement la tige à l'aide d'un petit filet d'eau; pour cela, on environnerait la tige d'un cylindre communiquant supérieurement avec un tuyau qui fournirait l'eau froide, et inférieurement avec un autre tuyau par lequel s'écoulerait l'eau échauffée. Le refroidissement serait rapide et exigerait peu d'eau, parce que la capacité calorifique du mercure est très-petite.

836. M. Collardeau a présenté à la Société d'encouragement, il y a quelques années, un thermomètre destiné aux chaudières à vapeur, et qu'il nomme *thermomanomètre*. Cet instrument est un grand thermomètre qui a été gradué dans la graisse au moyen d'un thermomètre étalon. L'échelle est tracée sur le verre; elle indique les pressions correspondantes aux différentes températures.

Les divisions correspondent à des $10^{es}$ d'atmosphère. La longueur du tube est de 50 à 60 centimètres; le tube est conique intérieurement, et son diamètre est décroissant du réservoir au sommet : M. Collardeau a employé cette forme pour donner plus d'étendue aux divisions supérieures. Le prix de l'instrument, non compris la monture, est de 35 fr.; en prenant un verre plus mince et un tube plus court, le prix est seulement de 25 fr.

A la rigueur, un thermomètre pourrait dispenser du manomètre, surtout lorsque la chaudière est garnie d'un bon indicateur du niveau, et d'un bon appareil d'alimentation; mais il est bien plus prudent d'avoir à la fois les deux instruments, parce que leur comparaison donne le moyen de reconnaître si la vapeur est saturée.

837. *Plaques fusibles*. Les plaques dont il est question sont des lames plus ou moins épaisses, formées d'un alliage, dans des proportions variables, de bismuth, de plomb et d'étain, qui n'est fusible qu'à la température que l'on ne veut pas dépasser; elles ferment des ouvertures pratiquées sur la chaudière; le contour de chaque plaque est maintenu sur le rebord de l'ouverture par un anneau à écrou. Quand la tempé-

rature de la vapeur a atteint celle de la fusion de la plaque, cette dernière entre en fusion, et laisse un libre passage à la vapeur.

838. Pour que les plaques fusibles remplissent leur fonction, elles doivent satisfaire à plusieurs conditions.

1° Elles doivent être composées des trois métaux que nous avons désignés, dans des proportions telles, que l'alliage soit fusible à une température un peu supérieure à celle sous laquelle la vapeur doit se former, mais qui soit encore bien inférieure à celle de la vapeur dont la force élastique correspond au minimum de résistance de la chaudière. L'ordonnance royale exige que chaque chaudière soit munie de deux plaques fusibles : l'une, la plus petite, à 10° au-dessus de la température correspondante à celle du travail ordinaire; et l'autre, à 20° au-dessus. Le tableau suivant donne la composition des alliages qui fondent à des températures correspondantes aux pressions comprises entre 1 et 8 atmosphères :

| NOMBRE d'atmosphères. | TEMPÉRATURE correspondante. | TEMPÉRATURE réelle de la fusion. | COMPOSITION DE L'ALLIAGE. | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | BISMUTH. | PLOMB. | ÉTAIN. |
| 1 | 100 | 100 | 8 | 5 | 3 |
| 1 1/2 | 112,2 | 113,3 | 8 | 8 | 4 |
| 2 | 121,4 | 123,3 | 8 | 8 | 8 |
| 2 1/2 | 128,8 | 130 | 8 | 10 | 8 |
| 3 | 135,1 | 132,4 | 8 | 12 | 8 |
| 3 1/2 | 140,6 | 143,3 | 8 | 16 | 14 |
| 4 | 145,4 | 145,4 | 8 | 16 | 12 |
| 5 | 153,8 | 153,8 | 8 | 22 | 24 |
| 6 | 160,2 | 160,2 | 8 | 32 | 36 |
| 7 | 166,5 | 160,5 | 8 | 32 | 28 |
| 8 | 172 | 172 | 8 | 30 | 24 |

2° Elles doivent être placées sur le collet d'une tubulure pratiquée à la partie supérieure de la chaudière, et retenue par un anneau garni de boulons. Et comme les plaques fusibles ont la propriété de se ramollir avant leur fusion, de se gonfler, et qu'alors elles pourraient souvent se

déchirer sous une pression correspondante à une température inférieure à celle de leur fusion, il faut les recouvrir d'un grillage en fonte (fig. 8 et 9 (pl. 22).

3° Les plaques fusibles doivent être placées à la partie supérieure de la chaudière, aussi peu éloignées que possible de sa surface; il serait même convenable, quand la chaudière est très-longue, d'en placer une à chaque extrémité.

4° Elles doivent avoir un diamètre au moins égal à celui des soupapes de sûreté. L'ordonnance royale exige que l'une des plaques, celle qui est fusible à la plus basse température, ait une surface égale à celle des soupapes, et l'autre une surface double.

839. Les plaques fusibles, disposées comme nous venons de le dire, étant soumises à une température voisine de celle de leur fusion, les alliages à proportions fixes, dont le mélange les constitue, étant fusibles à des températures différentes, on voit paraître à la surface des globules nombreux des alliages les plus fusibles, formant un bourrelet comme une tête de chou-fleur; quelquefois il se produit au centre une ouverture qui donne accès à la vapeur; mais il paraît que le plus souvent la fusion a lieu à la circonférence, et que la plaque est projetée avec force; du moins c'est ce que M. Halette et M. Séguin ont observé plusieurs fois. Cette projection, ayant lieu verticalement, ne peut occasionner aucun accident.

840. Relativement à l'efficacité des rondelles fusibles, nous rapporterons quelques expériences qui nous paraissent tout à fait concluantes.

Dans une expérience faite par M. Halette et M. Gauthier de Claubry, sur une chaudière en fonte à deux bouilleurs, et qui travaillait ordinairement sous une pression de 3 atmosphères, une rondelle fusible à 155° fut placée sur la partie supérieure de la chaudière située au-dessus du foyer; et une autre, fusible à 165°, fut placée à l'autre extrémité de la chaudière: la disposition était celle de la figure 4 (pl. 15). Le chauffeur activa beaucoup le feu. Après quelques instants, les soupapes commencèrent à jouer légèrement, on les chargea un peu, et bientôt le manomètre marqua 156°; un léger sifflement indiqua que la première rondelle commençait à se liquater; de petits globules passaient à travers la toile métallique. On ouvrit une soupape pour mettre fin à l'expérience et ne pas laisser fondre complétement la rondelle, qui n'aurait résisté que

quelques instants de plus. Cette rondelle, retirée, présentait à sa surface une foule de petits globules qui avaient passé à travers la toile métallique; elle était sensiblement concave à sa partie inférieure, et on y apercevait une fente qui aurait bientôt donné lieu à la séparation d'un disque. On reconnaissait d'ailleurs aisément que la rondelle eût été projetée bien avant cet instant, si elle n'eût été maintenue par une toile métallique. Cette expérience prouve que la toile métallique a préservé la rondelle de la déformation et de la rupture avant la fusion, et que la liquation ayant eu lieu à la température de la fusion de l'alliage, cette rondelle a parfaitement rempli son objet.

841. M. Séguin aîné avait placé, sur une chaudière d'un bateau à vapeur, deux rondelles fusibles: l'une à 145°, l'autre à 155°, températures correspondantes, la première à 4 atmosphères, la seconde à 5; par une mauvaise interprétation de l'ordonnance, la commission chargée d'en vérifier le placement n'a pas remarqué que ces plaques étaient celles qui correspondent à 3 atmosphères, tandis que la machine travaillait réellement à 4, et il en résulta que la température s'éleva suffisamment pour fondre la première rondelle. Cet effet eut lieu sans aucun accident; le métal, après s'être suffisamment ramolli, a été lancé contre les bords du bateau, et la vapeur s'est échappée comme par une soupape de sûreté.

La fusion d'une rondelle a eu lieu sur un bateau naviguant sur la Seine; il a été arrêté momentanément dans sa marche, mais il n'en est résulté aucun accident.

842. D'après ce qui précède, on doit considérer les plaques fusibles bien disposées comme étant d'une efficacité complète contre un accroissement de pression.

Il est important de remarquer que, pour des liquides qui bouillent à une température plus basse que celle de l'ébullition de l'eau, tels que l'alcool, l'éther, etc., il faudrait employer des plaques fusibles à une température inférieure à 100°. Les alliages de plomb, de bismuth et d'étain ne pourraient pas servir pour cet objet, car le minimum de température de fusion est trop voisin de 100°. Il y a quelques années, M. Pelletier, pharmacien, rue Jacob, avait placé de l'alcool dans une chaudière autoclave garnie, outre la soupape de sûreté, de deux plaques fusibles, l'une à 120°, l'autre à 140°; le métal n'a pas pu supporter la pression de la vapeur alcoolique correspondante à 120°, parce qu'à cette température, la pression

est beaucoup plus considérable que celle de la vapeur d'eau, et la chaudière a fait explosion. On pourrait peut-être abaisser la température de la fusion de l'alliage triple ordinaire par une addition de mercure, mais il y aurait lieu de craindre que ce dernier ne se séparât des autres à une température inférieure à celle de la fusion du mélange; il serait à désirer que l'on fît des expériences à ce sujet. Dans ce cas, les plaques minces pourraient être employées avec avantage.

843. Les figures 7, 8 et 9 (pl. 22) représentent la disposition la plus ordinaire des plaques fusibles. *mn* représente la plaque fusible; elle est maintenue par une plaque de fonte MN, percée d'un grand nombre d'orifices rectangulaires.

844. La figure 10 représente une disposition dans laquelle, au moyen d'une soupape P que l'on peut facilement lever, on arrête l'écoulement de la vapeur quand la plaque fusible est fondue, et on prévient l'interruption du travail qu'on ne peut empêcher par les dispositions ordinaires.

Les appareils (figures 4, 5 et 6, pl. 23) renferment une disposition analogue à la précédente.

845. Les figures 10, 11, 12 et 13 (pl. 23) qui sont des détails, sur une plus grande échelle, d'une partie de l'appareil général, figure 9 (pl. 23), imaginé par M. Sorel, représentent une disposition qui satisfait à la même condition que ceux que nous venons de décrire. Une tubulure en fonte, bifurquée, porte à chacune de ses extrémités une rondelle fusible, maintenue par une plaque de fonte à jours, serrée au moyen d'une vis qui passe à travers une anse en fer mobile autour de deux tourillons; un robinet permet de mettre une quelconque des rondelles en communication avec la chaudière.

846. Plusieurs explosions de chaudières à vapeur ayant eu lieu à la suite d'un abaissement considérable du niveau de l'eau dans la chaudière, on a pensé que ces accidents pourraient être prévenus par des plaques fusibles placées contre les faces de la chaudière, à une hauteur au-dessous de laquelle l'eau ne doit jamais descendre. Cette hauteur est celle du niveau de la limite de chauffe, car aussitôt que l'eau descend au-dessous, le métal s'échauffe directement par le courant de fumée, et acquiert une température beaucoup plus élevée que celle de la vapeur; alors la plaque fusible fondrait nécessairement, et l'écoulement direct de la vapeur, ou la suppression du travail, ou celle du chauffage, avertirait

le chauffeur de l'abaissement de niveau ; mais ces plaques seraient difficiles à remplacer.

847. Pour éviter cet inconvénient, M. Frimot a imaginé d'introduire dans le foyer un tube de cuivre terminé par une plaque fusible, et aboutissant à un point de la chaudière situé au-dessous du niveau que l'eau doit toujours conserver. Le tuyau, dans la partie qui sortait du fourneau, renfermait un robinet au moyen duquel on pouvait établir ou intercepter sa communication avec la chaudière ; le tube pouvait en outre se démonter facilement au-dessous du robinet. Quand la rondelle était fondue par suite de l'abaissement de niveau, on fermait le robinet de communication avec la chaudière, on retirait la partie du tube placée dans le foyer, on remettait une nouvelle rondelle avant de placer le tube, et on rétablissait les communications. Cet appareil fonctionne bien, mais il est compliqué et n'a point été adopté.

Les figures 1re et 2 (pl. 24) représentent la disposition imaginée par M. Frimot ; les détails que nous venons de donner dispensent de toute autre explication des figures.

848. M. Gally-Casalat a imaginé une disposition plus simple ; elle consiste en un tube métallique, fixé d'une part sur les bords d'un orifice percé dans la partie de la chaudière où l'on veut établir la plaque fusible, et de l'autre à un autre orifice situé à la partie supérieure de la chaudière. Le tube est un peu rétréci à la partie inférieure, et il est garni à l'autre extrémité d'un gros robinet dont la clef n'est pas forée de part en part, mais renferme seulement une cavité dans laquelle on peut loger un bouchon conique, en alliage fusible, que la rotation de la clef fait tomber dans le tube. Dans la partie de la chaudière occupée par la vapeur, le tube est percé de plusieurs trous. Il est facile de voir, d'après cette disposition, que quand l'eau n'environnera plus l'extrémité inférieure du tube, le bouchon conique fondra, la vapeur sortira, mais qu'en tournant le robinet un nouveau bouchon s'introduira dans le tube, qu'il descendra par son poids, et sera comprimé et mis en place par la pression de la vapeur. Cette disposition est ingénieuse, mais elle n'a point été essayée.

849. Les figures 3, 4, 5 et 6 (pl. 24) représentent la disposition dont il s'agit. La figure 7 est une modification de ces appareils imaginée par M. Chaussenot ; elle consiste en un tuyau latéral, garni d'un robinet qui

s'ouvre sur la partie supérieure de la chaudière, et qui communique avec le tuyau qui renferme le bouchon fusible; quand le bouchon a été introduit dans le tuyau, on le ferme; alors, en ouvrant le robinet, la vapeur le met en place. Le tuyau ne contient pas les petits orifices latéraux qui sont indispensables dans la disposition de M. Gally-Casalat.

850. *Plaques élastiques.* Avant qu'on ait pensé à recouvrir les plaques fusibles d'une plaque métallique à jours, destinée à s'opposer à leur gonflement et à leur déchirement, à une température inférieure à celle de leur fusion, on les regardait comme présentant peu de certitude dans leur effet; et on avait proposé de les remplacer par des plaques minces élastiques, disposées comme les plaques fusibles, et qui se déchireraient sous une certaine pression. Mais celles-ci présentent beaucoup plus d'inconvénients; il serait difficile de déterminer, pour un diamètre connu, l'épaisseur que devrait avoir la plaque pour se briser sous une pression donnée, et il serait plus difficile encore de se procurer des plaques d'un métal bien homogène et d'une épaisseur déterminée; aussi n'a-t-on pas donné de suite à cette substitution.

851. Dernièrement, M. de Maupeou a imaginé une nouvelle disposition pour l'emploi des plaques minces. Sur une ouverture percée au sommet de la chaudière, est adapté, par un de ses bouts, un tube en forme de siphon, et sur lequel est placé un robinet. Ce siphon se relève à son autre extrémité, et se termine par un godet dans lequel on place une plaque de plomb laminé, serrée par un écrou. Le godet est plein d'eau. Par cette disposition, la plaque reste toujours à la même température; par conséquent la ténacité du métal est constante; et quand la plaque a été rompue, en fermant le robinet du tube, on peut facilement la remplacer par une autre. Mais les lames de plomb cèdent toujours à la pression, elles se gonflent, s'amincissent, et crèvent après un certain temps sous des pressions très-petites comparativement à celles qu'elles ont supportées d'abord; ainsi cette disposition ne présente que des inconvénients.

M. de Maupeou a employé en même temps des flotteurs plus légers que l'eau, ouvrant une soupape par l'abaissement de niveau. Cette disposition était connue depuis longtemps. La figure 11 (pl. 24) représente les deux appareils réunis.

## § 6. — APPAREILS D'ALIMENTATION.

852. Ces appareils sont destinés, comme leur nom l'indique, à remplacer, dans la chaudière, l'eau qui se dégage en vapeur. Il est toujours important que l'alimentation ait lieu de manière que le niveau de l'eau, dans la chaudière, reste sensiblement constant; car si le niveau baissait, on pourrait brûler la chaudière, et on se trouverait dans des circonstances favorables aux explosions; si, au contraire, le niveau s'élevait trop, la vapeur étant gênée dans son dégagement, pourrait entraîner beaucoup d'eau avec elle.

La hauteur de l'eau, dans la chaudière, doit toujours dépasser de plusieurs centimètres la limite de la surface qui est chauffée par le courant d'air brûlé, du moins quand la chaudière fonctionne, afin que dans les temps d'arrêt, pendant lesquels l'eau n'est pas mêlée de vapeur, le niveau ne descende pas au-dessous de cette limite.

853. *Appareils d'alimentation pour les chaudières à basse pression, quand l'eau d'alimentation est placée dans un réservoir suffisamment élevé.* Cette circonstance se présente quand la vapeur est employée au chauffage, et que les appareils sont placés dans les étages supérieurs des bâtiments. Elle se rencontre encore dans les chaudières à basse pression destinées à faire mouvoir des machines, quand l'eau d'alimentation, à la sortie du condenseur, est élevée par la pompe alimentaire à une hauteur suffisante.

Dans le cas dont il s'agit, l'appareil le plus convenable consisterait en un tube communiquant avec le réservoir supérieur, plongeant jusqu'au fond de la chaudière, et garni d'un robinet (fig. 12, pl. 24). La hauteur de l'eau dans le réservoir, au-dessus du niveau de l'eau dans la chaudière, correspondant à une pression plus grande que celle de la vapeur, il est évident qu'en ouvrant le robinet on introduira de l'eau dans la chaudière; qu'en réglant convenablement les intermittences, on pourra ne faire varier le niveau de l'eau qu'entre des limites aussi resserrées qu'on voudra; et même, en laissant le robinet ouvert d'une certaine quantité qu'on déterminerait par tâtonnement, le niveau de l'eau dans la chaudière pourrait rester rigoureusement constant, si la production de vapeur et le niveau de l'eau dans le réservoir ne changeaient pas. Cette disposition est employée, mais elle a le grand inconvénient

d'exiger de la part du chauffeur une surveillance sur laquelle on ne peut pas toujours compter.

854. Les figures 13, 14 et 15 (pl. 24) représentent une disposition qui est assez généralement employée. Le tube AB, qui plonge jusqu'à une petite distance du fond de la chaudière, communique avec le réservoir supérieur ; il est interrompu à une petite distance de la chaudière, par un robinet horizontal dont les deux extrémités de la clef sont fixées à un levier qui supporte à l'un des bouts le fil d'un flotteur, et à l'autre un contre-poids. La clef du robinet étant tournée de manière qu'elle commence à intercepter la communication entre les deux parties du tuyau, quand le niveau est à la hauteur convenable, il est évident que le plus léger abaissement du niveau permettra à l'eau de s'introduire dans la chaudière. Il est utile, dans ces appareils, de ne pas anéantir les petits mouvements oscillatoires du flotteur, parce que la clef du robinet étant alors sans cesse en mouvement dans son boisseau, elle *grippe* difficilement, et d'ailleurs, si le mouvement cessait, on serait averti que le robinet adhère au boisseau. Il est bien entendu que le diamètre de l'orifice de la clef du robinet doit être calculé de manière que cet orifice, sous la charge donnée, puisse fournir une quantité d'eau plus grande que celle qui est nécessaire à l'alimentation de la chaudière.

855. La figure 1re (pl. 25) offre une disposition dans laquelle il y a moins de frottement à vaincre, et qui fonctionne plus régulièrement. Le tuyau ABCD communique avec le réservoir, et descend jusqu'à une petite distance du fond de la chaudière. Le cylindre *mn*, qui glisse facilement dans le tuyau qui l'enveloppe, est échancré annulairement à la hauteur des douilles qui reçoivent les tuyaux AB et CD, de manière que, quand il s'appuie par son rebord sur le fond de la cuvette qui termine le tube enveloppant, la communication se trouve établie entre la chaudière et le réservoir. Le cylindre mobile est percé d'un canal central qui sert à établir la pression de la vapeur sur ses deux bouts, et qui donne en même temps passage au fil de suspension du flotteur ; ce fil est garni d'un arrêt qui relève le cylindre et arrête l'alimentation lorsque le niveau de l'eau est à une certaine hauteur. De l'autre côté du cylindre, le fil a également un arrêt qui maintient le cylindre en place, quand le niveau est au-dessus de la limite assignée. Cet appareil fonctionne très-régulièrement.

856. L'appareil figure 2 (pl. 25) peut aussi être employé en toute sécurité. Le flotteur est plus léger que l'eau, suspendu intérieurement à l'extrémité d'une barre autour de laquelle il tourne librement; le prolongement de cette barre fait mouvoir la tige d'une soupape qui donne accès à l'eau d'alimentation quand le niveau est trop bas. Le prolongement de la tige passe à travers une boîte à étoupe, et son extrémité indique sur une échelle le niveau de l'eau, quand ce niveau est au-dessous de la limite fixée. Dans cet appareil, la surface de l'orifice fermé par la soupape doit avoir les plus petites dimensions possibles, et le flotteur doit être très-grand, afin que le jeu de la soupape ne soit point modifié par les variations de pression de la vapeur.

857. Dans la plupart des machines à basse pression, le régulateur d'alimentation est disposé comme dans la figure 3 (pl. 25). L'eau d'alimentation est amenée par une pompe dans la cuvette M, d'où elle tombe dans la chaudière par l'orifice de la soupape *m*, dont le mouvement dépend de celui du flotteur.

Les figures 4 et 5 (pl. 25) représentent sur une plus grande échelle et avec d'autres formes, les détails de construction de la cuvette d'alimentation.

858. On pourrait disposer l'appareil de manière à éviter la boîte à étoupe. La figure 6 (pl. 25) présente un arrangement qui satisfait à cette condition. Le flotteur est plus léger que l'eau, et réuni à un contrepoids par un fil métallique très-fin, interrompu par une chaîne dans les parties qui s'enroulent sur les poulies. Ce fil est attaché aux deux extrémités de l'axe de la soupape, qui s'ouvre alors quand le flotteur descend. Cet appareil n'a pas été employé.

859. La figure 7 (pl. 25) représente l'appareil d'alimentation d'une machine à basse pression établie à la gare de Saint-Ouen. Cet appareil est analogue à celui de la figure 3; mais la boîte à étoupe a été évitée par l'emploi d'un flotteur annulaire plus dense que l'eau, dont le fil de suspension passe dans un tube qui s'élève jusqu'à la hauteur de la cuvette. Cet appareil est en même temps disposé pour fermer le registre de la cheminée, et par conséquent diminuer la production de la vapeur quand sa force élastique dépasse la limite fixée. La colonne qui s'élève au-dessus de la chaudière renferme un flotteur en fonte, figure 8, qui par l'air qu'il renferme est plus léger que l'eau; il est soutenu par une chaîne qui passe dans le tuyau que porte la cuvette, s'enroule sur

deux poulies fixes, et supporte à son autre extrémité une plaque verticale qui ferme plus ou moins la cheminée. Les figures 9 et 10 représentent sur une plus grande échelle une coupe verticale et une projection horizontale de la cuvette.

860. *Appareils d'alimentation pour les chaudières à haute ou à basse pression, qui remplacent les pompes d'alimentation.* Tous les appareils que nous venons de décrire supposent nécessairement que l'eau d'alimentation soit placée dans un réservoir situé au-dessus de la chaudière et à une hauteur qui corresponde à une pression plus grande que celle que la vapeur peut acquérir. Par conséquent si l'eau d'alimentation ne se trouvait pas naturellement à cette hauteur, il faudrait employer une pompe pour l'élever dans le réservoir. Les appareils que nous allons décrire dispensent complétement de l'emploi d'une pompe; ils sont par conséquent d'une très-grande utilité pour les chaudières de chauffage, d'autant plus qu'ils fonctionnent aussi bien à une haute pression qu'à une basse pression.

861. L'appareil représenté figure 11 (pl. 25) se compose d'un vase M entièrement fermé et placé à une certaine hauteur au-dessus de la chaudière; ce vase communique par sa partie inférieure avec un tube AB, qui plonge dans le réservoir d'eau d'alimentation, et qui est interrompu par une boîte G garnie d'une soupape qui s'ouvre par une pression de bas en haut; le vase M communique avec le fond de la chaudière par un tube CD qui part de sa partie inférieure et qui est garni du robinet H; la partie supérieure du vase communique avec la partie supérieure de la chaudière au moyen du tube EF garni du robinet I. Enfin le vase est traversé par un petit tube $m\,n$, ouvert à sa partie supérieure et garni à la partie inférieure du robinet $p$.

Pour se servir de cet appareil on ferme le robinet H et on ouvre les robinets I et $p$; la vapeur s'introduit dans le vase et sort par l'orifice $p$ en entraînant l'air; après quelques instants, quand on suppose que la totalité de l'air a été expulsé, on ferme les deux robinets d'entrée et de sortie de la vapeur. L'air extérieur condense la vapeur qui remplit le vase, la pression intérieure devient bientôt plus petite que la pression extérieure, et le vase se remplit de l'eau d'alimentation. Si on ouvre alors le robinet I, la vapeur de la chaudière s'introduit dans le vase; dans les premiers instants, elle se condense en partie à la surface de l'eau;

mais quand une couche mince de ce liquide a été suffisamment échauffée, la pression dans le vase M se trouve sensiblement la même que dans la chaudière, et si on ouvre le robinet H, l'eau du vase entre dans la chaudière. Lorsque l'eau est écoulée, ce qu'on reconnaît à l'indication d'un tube de niveau placé latéralement (figure 12), on ferme les robinets H et I; quelques instants après, le vase M se trouve rempli d'eau par la condensation de la vapeur, et en ouvrant de nouveau et successivement les robinets I et H, on introduit une nouvelle quantité d'eau dans la chaudière. Il est important de remarquer que l'élévation de l'eau dans le réservoir M coûte toute la quantité de chaleur que renferme un volume de vapeur égal à celui du réservoir, mais que la chaleur abandonnée par la vapeur quand on établit dans le vase M la tension de la chaudière, n'est point perdue, car elle élève la température de l'eau d'alimentation.

Dans l'alimentation des chaudières à haute pression par un réservoir fermé, supérieur à la chaudière, il faut avoir soin que le robinet à vapeur s'ouvre un peu avant l'autre, attendu que les premières vapeurs qui arrivent sont condensées, et qu'alors l'eau de la chaudière remonterait dans le réservoir si le tuyau à eau était ouvert.

Dans cet appareil, on peut supprimer le robinet H, et le remplacer par une boîte renfermant une soupape qui ne s'ouvre que par un excès de pression dans le vase M, résultant et de la pression de la vapeur et du poids d'une colonne d'eau, figure 1 (pl. 26). Alors, pour faire fonctionner l'appareil, on n'a qu'un seul robinet à tourner, celui qui conduit la vapeur dans le réservoir; quant au robinet *p*, on ne l'ouvre que quand on met l'appareil en activité, ou quand il s'est introduit de l'air dans le réservoir.

862. Ces derniers appareils remplacent complétement les pompes, et on peut y adapter des dispositions très-simples, au moyen desquelles la vapeur s'introduise dans le vase à des intervalles convenables pour que, pendant leur durée, le vase se remplisse d'eau par la condensation de la vapeur qui s'y trouve après chaque alimentation.

863. L'appareil figure 2 (pl. 26) est disposé exactement comme celui de la figure 1re (pl. 25), mais le tuyau ABC est garni d'un robinet qu'on ne ferme que quand l'appareil ne fonctionne pas, et le tube ne communique qu'avec la partie supérieure de la chaudière; en outre, le cylindre mobile doit se mouvoir avec un frottement assez dur dans son enveloppe, pour

ne pas être entraîné par son propre poids. L'appareil est représenté à l'instant où la vapeur passe librement de la chaudière au vase; alors l'eau du vase tombe dans la chaudière, son niveau s'élève, l'arrêt inférieur de la tige du flotteur monte graduellement, et quand il a atteint le cylindre mobile, la communication est interrompue entre les parties B et C du tuyau. A partir de cet instant, le niveau s'abaisse dans la chaudière; mais le cylindre reste immobile jusqu'à ce que l'arrêt supérieur du fil ait atteint la partie supérieure du cylindre, c'est-à-dire jusqu'à ce que le niveau soit descendu d'une quantité égale à la différence entre la distance des deux arrêts et la longueur du cylindre. Dans cette disposition, il est évidemment important de diminuer les oscillations du flotteur. Pour que l'appareil fonctionne régulièrement, il faut que le temps nécessaire à la condensation de la vapeur contenue dans le réservoir, par le seul effet du refroidissement extérieur, augmenté de celui que l'eau met à remplir le vase, soit plus court que le temps nécessaire à la vaporisation d'un volume d'eau égal à celui que la chaudière renferme dans une hauteur égale à la distance des 2 arrêts, diminuée de la longueur du cylindre.

864. La figure 3 (pl. 26) présente un autre appareil qui produit le même effet. Le flotteur est suspendu à l'extrémité d'un levier *oa* dont l'autre bras *ob*, beaucoup plus long, supporte un poids suspendu à l'extrémité d'une fourchette *cd*, garnie à chaque bout d'un petit galet. Dans cette fourchette s'engage le levier *ef*, mobile autour du point *f*. Le prolongement *fg* de ce levier porte une pièce articulée *gl*, à l'extrémité de laquelle s'engage le levier *mn* fixé à la clef du robinet qui établit ou intercepte la communication de la partie supérieure de la chaudière avec le haut du vase. Enfin un levier *fh*, perpendiculaire aux leviers *ef* et *fg*, invariablement fixé avec eux, porte à son extrémité une boule métallique *k*; deux arrêts règlent les limites des mouvements de la boule. Dans la disposition de la figure, le robinet est fermé, et le niveau en s'abaissant fera monter le point *d*; aussitôt qu'il rencontrera le point *e*, le levier *ef* se relèvera ainsi que la boule *k*, et en même temps le point *l* se rapprochera de *m*, et aussitôt que la boule *k* aura dépassé la verticale du point *f*, elle tombera brusquement de l'autre côté, et l'extrémité supérieure de la fourchette qui était en contact avec l'extrémité du levier *mn*, l'abaissera brusquement

en ouvrant le robinet. L'alimentation aura lieu ; le poids P descendra, et, arrivé à un certain point de sa course, il ramènera brusquement le poids *k* dans la position indiquée par la figure, en fermant le robinet.

On pourrait remplacer ces appareils par un autre plus simple, qui se composerait d'un réservoir garni de deux robinets, l'un supérieur pour le remplir, l'autre inférieur pour le vider dans la chaudière ; mais le tuyau d'alimentation ne devrait pas plonger dans l'eau de la chaudière, et l'orifice du robinet inférieur devrait être assez grand pour permettre à l'eau de tomber, et à la vapeur de la remplacer.

865. *Alimentation des chaudières à haute pression appliquées à des machines.* Dans les chaudières à haute pression appliquées à des machines, l'alimentation a lieu par des pompes dont on règle l'effet, ou par un robinet placé dans le tuyau d'aspiration, ou par un robinet placé dans le tuyau d'écoulement ; dans ce dernier cas, la pompe est pourvue d'un tuyau de décharge renfermant une soupape pressée par un poids qui excède la pression dans la chaudière, ou le tuyau de décharge s'élève à une assez grande hauteur pour que le poids de la colonne d'eau qu'il peut contenir excède la pression de la vapeur. Ces tuyaux de décharge, dans le cas où le robinet est placé dans le tuyau d'écoulement, sont absolument indispensables, car la pompe doit débiter tout le volume d'eau qu'elle a aspiré ; l'absence d'un tuyau de décharge produirait, ou l'arrêt de la machine, ou la fracture de la pompe.

866. La figure 4 (pl. 26) représente une pompe d'alimentation avec un robinet dans le tuyau d'aspiration et dans celui d'alimentation. Le corps de pompe renferme une soupape de décharge pressée par un levier.

867. Les figures 5 et 6 (pl. 26) représentent une autre disposition de pompe alimentaire. Le tuyau d'alimentation est garni d'un robinet, précédé d'un tuyau de décharge à soupape. La hauteur du tuyau de décharge doit être évidemment plus grande que la colonne d'eau qui ferait équilibre à l'excès de tension de la vapeur sur la pression atmosphérique.

868. Les figures 1 et 2 (pl. 27) représentent une autre disposition de pompe alimentaire imaginée par M. Séguier.

Pour éviter de placer une soupape destinée à faire passer l'eau injectée par la pompe dans le tuyau de décharge quand on ferme le robinet du tuyau qui conduit l'eau à la chaudière, on pourrait employer, à la place de ce dernier, un robinet à trois eaux, de manière que l'eau

soit toujours en communication ou avec la chaudière, ou avec le tuyau de décharge.

869. On peut remplacer le robinet régulateur, placé dans le tuyau qui conduit l'eau à la chaudière, par un appareil mis en mouvement par un flotteur. Les appareils que nous avons décrits (855) (856) peuvent être employés.

870. On pourrait aussi employer, pour le même objet, l'appareil plus simple figure 7 (pl. 26). Il est composé d'un corps de pompe fermé par le bas, ouvert à la partie supérieure, garni latéralement de deux tubulures opposées, dont l'une communique avec la pompe, et l'autre avec le fond de la chaudière, et fixé sur la chaudière. Ce corps de pompe renferme un cylindre d'un diamètre très-peu différent, percé de part en part, et, dans son axe, d'un canal ouvert par les deux bouts; sa surface est garnie, à une certaine hauteur, d'une rainure annulaire, et il est suspendu à un levier dont l'extrémité supporte le flotteur au moyen d'un fil de cuivre qui traverse une boîte à étoupe. On voit, d'après cette disposition, que l'alimentation aura lieu aussitôt que l'échancrure annulaire se trouvera en face des tubulures, que l'eau ou l'air qui pourraient se trouver à la partie inférieure du corps de pompe se dégageront pendant l'abaissement du piston par le canal central, et que l'air rentrera par le même chemin dans cet espace lors de l'élévation du piston.

871. L'appareil figure 8 (pl. 26) offre une disposition que l'on peut également employer pour régler l'alimentation d'une chaudière par une pompe. Le flotteur fait mouvoir une tige à laquelle se trouvent fixées deux soupapes qui établissent ou interceptent la communication de l'eau avec la chaudière ou avec le tuyau de décharge.

872. M. Séguier a imaginé une disposition très-simple pour régler le jeu de la pompe alimentaire de manière à maintenir l'eau à une hauteur constante dans la chaudière; cette disposition est représentée figure 9 (pl. 26). A, chaudière. B, bouilleur. C, cylindre fermé par les deux bouts et qui reçoit l'eau de la pompe. E, tuyau d'aspiration. F, tuyau de refoulement. G, tuyau qui conduit l'eau dans un des bouilleurs. H, tuyau qui fait communiquer la partie supérieure de la chaudière avec la partie supérieure du cylindre C. *a*, niveau de l'eau dans la chaudière. *b*, flotteur plus léger que l'eau, attaché par une tringle à la soupape *c*. *d*, soupape d'aspiration de la pompe. Par cette disposition,

l'eau sera toujours à la même hauteur dans le cylindre C que dans la chaudière; et, lorsque le niveau sera trop élevé dans la chaudière, la soupape *c* sera levée, la pompe aspirera l'eau du cylindre C pour la refouler ensuite dans le même espace. On voit que l'alimentation n'aura lieu que quand la soupape *c* sera fermée, ce qui n'arrivera qu'autant que le niveau de l'eau dans la chaudière sera au-dessous de la limite fixée.

873. *Appareils d'alimentation appliqués aux réservoirs d'eau de condensation, pour les chaudières à vapeur employées au chauffage.* Lorsqu'une chaudière à vapeur est employée au chauffage, on l'alimente toujours avec l'eau de condensation, d'abord parce que cette eau est à une température supérieure à celle de l'atmosphère, mais surtout parce que, ayant été distillée, elle ne renferme point de sels en dissolution et qu'elle ne forme point de dépôt dans les chaudières. En supposant qu'il n'y ait pas de fuite de vapeur dans les appareils de chauffage, le retour continu de l'eau de condensation devrait maintenir un niveau constant dans la chaudière, ou son retour intermittent des variations de niveau comprises entre des limites fixes.

874. Il semble, au premier abord, que si les appareils de chauffage étaient placés à un niveau plus élevé que la chaudière, on pourrait toujours faire revenir directement l'eau de condensation dans la chaudière. Mais il n'en est pas ainsi, du moins les retours d'eau directs ne fonctionnent pas régulièrement. En effet, de quelque manière que l'appareil de chauffage soit disposé, il se compose toujours d'un tube plus ou moins long qui communique par un bout avec la chaudière; alors, pour que l'eau de condensation retourne au générateur, il faut, ou que le tube s'élève constamment et soit fermé à son extrémité, alors l'eau retourne à la chaudière en sens contraire du mouvement de la vapeur; ou que le tube s'élève, d'abord par le plus court chemin, au-dessus des corps qui doivent être chauffés, et qu'il descende ensuite constamment jusqu'au fond de la chaudière, alors la plus grande partie de l'eau condensée retournera à la chaudière par cette dernière partie du circuit.

Mais, dans le premier cas, la vitesse de la vapeur pourrait donner à l'eau un mouvement opposé à celui que la pente du tuyau tend à lui imprimer, et on ne pourrait être assuré de l'efficacité de l'appareil qu'autant qu'on emploierait des tuyaux d'un grand diamètre, dans les-

quels la vapeur n'aurait qu'une très-petite vitesse, ce qui est rarement praticable, et occasionnerait toujours de grandes dépenses d'établissement et une grande perte de chaleur par la condensation de la vapeur dans les tuyaux de conduite.

Dans le second cas, le retour de l'eau dans la chaudière n'aurait lieu qu'autant que la pression de la vapeur au-dessus de la colonne d'eau condensée, augmentée du poids de cette colonne, l'emporterait sur la pression de la vapeur dans la chaudière, circonstance qui n'existerait que dans quelques cas particuliers; en outre, l'eau de la chaudière pourrait s'élever dans le tuyau de retour et produire un abaissement considérable du niveau. A la vérité, on éviterait cet accident, qui serait très-fréquent, surtout au commencement du chauffage, en plaçant dans le tuyau une soupape qui ne s'ouvrirait que par une pression exercée de haut en bas; mais l'alimentation n'en deviendrait pas plus certaine, et l'eau de condensation pourrait même s'accumuler dans une partie du tube où la vapeur doit se condenser pour produire le chauffage, de manière à diminuer notablement l'effet produit.

Ainsi, on voit que les retours d'eau directs ne sont possibles que dans des cas particuliers, et qu'il faut presque toujours des appareils spéciaux pour effectuer l'alimentation des chaudières.

875. La figure 3 (pl. 27) représente un appareil d'alimentation intermittent par l'eau de condensation, imaginé par M. Halette, et qui est employé dans plusieurs fabriques de sucre indigène. A est un cylindre incliné communiquant avec l'air, et dans lequel se réunissent toutes les eaux qui proviennent de la condensation de la vapeur. Cette eau peut s'écouler dans le cylindre B par un tuyau garni d'un clapet *ab* incliné, qui ne permet l'écoulement que quand la pression dans ce dernier vase est plus petite que celle de l'atmosphère, augmentée de la hauteur de la colonne d'eau depuis le niveau dans le vase A jusqu'à l'orifice d'écoulement. Le vase B renferme un flotteur C plus léger que l'eau, formé d'une boule creuse en cuivre fixée à l'extrémité d'une tringle *cd* qui passe à travers une boîte à étoupe, est interrompue au delà par une fourchette *ef* garnie de galets à ses deux extrémités, et se termine par une tige *gh* qui s'engage dans un guide *i*. Un tuyau, qui n'est point indiqué par la figure, établit une communication entre le fond du vase B et le fond de la chaudière; il est garni d'un clapet placé près de la chau-

dière, qui intercepte toute communication quand la pression de la vapeur est plus grande que celle qui agit en sens contraire pour faire écouler l'eau. Le tuyau *kl* communique avec la partie supérieure de la chaudière et aboutit à un robinet à 3 eaux D, qui reçoit les deux autres tuyaux *mn* et *op*, dont le premier communique avec le réservoir B, et l'autre avec l'extérieur. Le levier de la clef du robinet est mis en mouvement par une tringle *qs* articulée à l'extrémité *q* du levier à trois branches E*r*, E*q* et EF, dont la branche E*r* est engagée dans la fourchette *ef*, et dont l'extrémité F de la branche EF porte un contre-poids. L'appareil est représenté à une époque où le robinet D établit la communication du vase B avec l'atmosphère; l'eau du vase A tombe dans le réservoir B. Lorsque, par l'élévation du niveau de l'eau, le galet *e* aura rencontré la tige E*r*, le poids F se relèvera; quand il aura dépassé la verticale du point de rotation, et que l'extrémité du levier de la clef du robinet D sera au sommet *s* de la fourchette *st*, alors le poids tombera brusquement au point F′, le robinet D, en tournant, fera communiquer la chaudière avec le réservoir B, et l'eau s'écoulera dans la chaudière. Quand le niveau de l'eau dans le réservoir sera abaissé à une certaine limite, le poids reviendra à la position indiquée par la figure, et le robinet D s'ouvrira de manière à établir une communication entre le réservoir B et le tuyau *op* qui communique avec l'extérieur; alors l'eau du réservoir A commencera de nouveau à s'écouler dans le réservoir B. Cet appareil a été établi dans plusieurs fabriques de sucre de betterave, et dans plusieurs raffineries de sucre; il fonctionne avec une grande régularité.

876. La figure 4 (pl. 27) représente un appareil qui remplit le même but que celui que nous venons de décrire, et qui a avec lui la plus grande analogie. L'eau de condensation arrive dans le réservoir B par un tuyau *ab* garni d'un clapet *a*, et en sort pour entrer dans la chaudière par le tuyau *cd* garni d'un clapet *d*. Le robinet *k*, qui établit ou intercepte la communication du vase B avec la vapeur, s'ouvre et se ferme par un mouvement produit par le flotteur; mais le robinet *n*, qui permet d'évacuer l'excès de vapeur du réservoir B, s'ouvre à la main; un clapet empêche le retour de l'air.

Les réservoirs B de ces deux appareils devraient être garnis de tubes pour qu'on pût y connaître le niveau de l'eau.

877. On emploie, dans quelques fabriques de sucre indigène, l'appareil d'alimentation indiqué par la figure 5 (pl. 27). Cet appareil se compose de deux vases cylindriques A et B, ayant la forme des chaudières ordinaires et placés l'un au-dessus de l'autre, et d'un réservoir d'eau froide C plus élevé. L'eau de condensation, mêlée de vapeur, arrive par le tube *mn*; la vapeur se condense dans le serpentin *pq p'q'*, et l'eau condensée retombe dans le vase B. On fait tomber l'eau chaude dans le vase A en ouvrant les robinets *b* et *b'*; et l'eau du vase A dans la chaudière, en ouvrant d'abord le robinet *c*, et ensuite le robinet *d*. La soupape *k* sert au retour direct de l'eau condensée à la chaudière, quand ce retour est possible, c'est-à-dire, quand la pression de la vapeur sur l'eau de condensation, augmentée de la charge de la colonne d'eau chaude, est plus grande que la pression de la vapeur dans la chaudière.

878. Dans toutes les chaudières dont la vapeur est employée comme force motrice, on pourrait se servir, pour l'alimentation, d'un appareil beaucoup plus simple que ceux que nous avons décrits; il consisterait en un robinet placé sur la chaudière, dont la clef serait horizontale et renfermerait seulement une cavité, et dont la partie supérieure du boisseau communiquerait avec le réservoir d'alimentation, et la partie inférieure avec la chaudière. Il est évident qu'à chaque tour, le robinet verserait dans la chaudière un volume d'eau égal à celui de l'encoche; on pourrait alors déterminer, ou la vitesse de rotation, ou le volume de la cavité, de manière à fournir à la chaudière un volume d'eau égal à celui qui se réduit en vapeur; on pourrait même disposer l'appareil de manière à faire varier la vitesse de rotation ou le volume de l'encoche suivant le besoin. Cet appareil mériterait d'être examiné; il ne coûterait évidemment que le travail dû au frottement, car le volume de vapeur que l'encoche ramènerait à chaque tour dans le réservoir d'alimentation, serait employé utilement à échauffer l'eau.

879. *Machine à vapeur spéciale pour l'alimentation des chaudières.* Lorsque les chaudières sont destinées au chauffage et qu'elles ont de grandes dimensions, on les alimente quelquefois par une très-petite machine à vapeur qui fait mouvoir la pompe alimentaire; l'alimentation étant d'ailleurs réglée à la main par un robinet ou par un appareil à flotteur. Ces machines sont toujours à haute pression, sans détente et sans condensation; mais la vapeur, à sa sortie du cylindre, passe ordinaire-

ment dans un serpentin placé dans la bâche qui renferme l'eau d'alimentation. Ces machines sont très-économiques, car la chaleur de la vapeur étant utilisée, le travail nécessaire à l'alimentation ne coûte réellement rien.

La planche 28 représente plusieurs élévations et les détails de construction d'une de ces machines.

La figure 1re est une vue de côté, et la figure 2 une vue de face de la machine. Le corps de pompe C et le cylindre à vapeur C′ ont leur axe sur la même verticale; le piston plein de la pompe et la tige du piston à vapeur sont réunis au point H dans un manchon qui fait partie d'une tige horizontale DD qui les force à se mouvoir verticalement. A cet effet, la pièce DD, sur laquelle est fixée la tête de la bielle qui imprime le mouvement de rotation à l'axe du volant, est terminée de chaque côté par deux parties annulaires *dd* qui embrassent les colonnes G, G′ qui la guident, et qui servent en outre à maintenir le cylindre à vapeur dans une position invariable.

TT représente le tiroir à vapeur; AA, le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière dans le cylindre. Un robinet R intercepte la communication quand la machine ne marche pas. *o* est l'orifice de sortie de la vapeur. SS est le tube qui la conduit du cylindre au réservoir d'alimentation où elle se condense. *l* est la tige fixée à la coquille; elle traverse la partie saillante Z du cylindre, qui la maintient dans une direction verticale, et est réunie par articulation aux deux tiges L,L, au moyen desquelles l'excentrique EE, placé sur l'axe du volant, lui communique le mouvement, et par suite à la coquille. Les deux tiges LL doivent se réunir en un point tel, que la pièce horizontale DD, qui se meut verticalement entre elles, ne les rencontre jamais.

MM est la manivelle; V, le volant. L'axe commun est supporté d'un côté par la colonne G′ qui, à cet effet, prend à la partie inférieure une forme analogue à celle du support KK qui soutient l'autre extrémité de l'axe. S,S′ sont des boîtes à étoupe.

*t* est une bride qui réunit le corps de pompe au tuyau d'aspiration *aa* et au tuyau *ee* d'alimentation de la chaudière. On voit (fig. 3), sur une plus grande échelle, une coupe de la pompe d'alimentation. *s* et *s′* sont les soupapes disposées de manière que la levée du piston détermine l'aspiration de l'eau dans le corps de pompe, et que son abaissement produise le refoulement de cette eau dans la chaudière. *r* est un

robinet qui règle la quantité d'eau nécessaire à l'alimentation de la chaudière. $r'$ est un autre robinet qu'on ferme quand la machine ne marche pas. $f$ est une fermeture facile à enlever quand on veut examiner l'état des soupapes.

Tout le système est monté sur une plaque de fonte XX, dont on voit le plan figure 8, et qui est fixée solidement sur un massif Y, en bois ou en maçonnerie.

La figure 4 représente une coupe verticale du cylindre à vapeur sur une plus grande échelle, et la figure 5 la projection horizontale. La figure 6 est une coupe horizontale faite à la hauteur 1,2, et la figure 7 une autre coupe par un plan horizontal passant par 3,4. Les mêmes lettres désignent les mêmes objets que dans les figures 1 et 2.

Dans la figure 4, la position de la coquille suppose que la vapeur arrivant de la chaudière par l'ouverture $o'$, se rende à la partie supérieure du cylindre. Le piston est sur le point de descendre, et la vapeur qui se trouve au-dessous de lui sera refoulée dans l'espace I, d'où elle s'échappera par le tuyau S.

880. Dans le système de machine que nous venons de décrire, la vapeur agit successivement en dessus et en dessous du piston. Une disposition plus simple consisterait à faire la machine à simple effet, et à la disposer de manière que la vapeur arrive seulement sous le piston pour le soulever, et que celui-ci, par son poids convenablement calculé, descende de lui-même, et pousse dans la chaudière l'eau qui a été aspirée dans le corps de pompe pendant son élévation.

881. La pompe, au contraire, est à simple effet, mais on pourrait produire une alimentation continue, c'est-à-dire, aspirer à la fois de l'eau du réservoir et la refouler dans la chaudière pendant la montée comme pendant la descente du piston, en employant une pompe à double effet.

Les figures 9 et 10 représentent une disposition de ce genre. La première est la coupe verticale de la pompe, et la seconde une coupe horizontale suivant *ab*. Le corps de pompe P se trouve terminé par des boîtes rectangulaires BB, en fonte, communiquant avec le réservoir d'alimentation par des tuyaux R, R', et avec la chaudière par les tuyaux C, C'. Des soupapes $s, s'$ sont placées dans chaque boîte, de manière qu'en dévissant les écrous E, E placés au-dessus, on puisse les visiter et les graisser avec facilité. Supposons que le piston monte,

les soupapes $s'$, $s'$ seront fermées, et les soupapes $s$, $s$ s'ouvriront pour livrer passage, l'une à l'eau qui est aspirée par le tuyau R, l'autre à l'eau qui est refoulée par le tuyau C' dans la chaudière; quand le piston descendra, les soupapes $s, s$ se fermeront et les autres s'ouvriront, l'aspiration de l'eau aura lieu par le tuyau R' et l'alimentation de la chaudière par le tuyau C.

882. De tout ce qui précède, on peut déduire les principes suivants. Lorsque les chaudières sont appliquées à des machines, il est toujours avantageux d'effectuer l'alimentation par des pompes mises en mouvement par la machine elle-même. Lorsque les chaudières sont destinées à de grands chauffages, il est encore avantageux de produire l'alimentation par une pompe mue par une petite machine à vapeur spéciale. Quand la quantité de vapeur que doit fournir la chaudière, doit être constante, ou qu'elle ne doit varier que dans des limites très-restreintes, on peut se contenter de régler l'alimentation par un robinet à la disposition du chauffeur. Mais si la quantité de vapeur à produire devait éprouver de grandes variations, il faudrait régler l'alimentation par un flotteur. Enfin, pour les petites chaudières employées au chauffage, on peut se servir des différents modes d'alimentation que nous avons indiqués pour suppléer à l'action des pompes.

## § 7. — APPAREILS POUR SÉPARER DE LA VAPEUR L'EAU QU'ELLE ENTRAÎNE.

883. Lorsque la vapeur sort d'une chaudière, elle entraîne toujours avec elle une certaine quantité d'eau liquide en très-petits globules. Cette eau provient des enveloppes des bulles de vapeur, qui viennent crever à la surface de l'eau. La quantité d'eau entraînée est très-grande quand on ouvre subitement une large issue à la vapeur, à cause de l'ébullition tumultueuse qui en résulte, surtout quand l'orifice d'écoulement de la vapeur est situé au-dessus d'un des tubes de communication de la chaudière avec un bouilleur. Dans certaines circonstances on voit sortir une espèce d'émulsion semblable à de l'eau de savon battue. L'existence de l'eau à l'état liquide dans la vapeur est constatée par la présence des dépôts que produit l'eau dans tous les tuyaux qui conduisent la vapeur. Cette eau, entraînée mécaniquement, occasionne des pertes considérables de chaleur quand la vapeur est employée comme force

motrice; car, dans ce cas, toute la chaleur renfermée dans l'eau est perdue. Il n'en est pas ainsi quand la vapeur d'eau est employée pour le chauffage; mais, dans ce cas, elle a l'inconvénient de former des dépôts qui, à la longue, peuvent obstruer les tuyaux de chauffage, ou du moins diminuer leur conductibilité.

884. M. de Pambour a fait des expériences nombreuses sur des machines locomotives pour déterminer la quantité d'eau entraînée par la vapeur. Le mode d'expérience qu'il a employé consistait à opérer dans des circonstances où la densité de la vapeur, dans le cylindre, était égale à celle de la vapeur dans la chaudière, et à comparer par le nombre des coups de piston le volume de vapeur dépensé avec celui qui aurait été produit par l'eau consommée. Il a trouvé ainsi que le poids de l'eau entraînée s'élevait à 0,32 de celui de la vapeur. Mais M. de Pambour reconnaît que cette quantité doit varier dans des limites très-étendues avec la disposition des chaudières.

885. On a imaginé plusieurs moyens de débarrasser la vapeur de l'eau liquide qu'elle contient; nous les indiquerons successivement.

On a d'abord fait communiquer l'orifice par lequel la vapeur doit sortir de la chaudière, avec un tuyau de même diamètre, horizontal, occupant dans la chambre de vapeur toute la longueur de la chaudière, et percé à sa partie supérieure d'un grand nombre d'orifices dont les diamètres vont en croissant à mesure qu'ils s'éloignent de l'orifice de sortie, et dont la somme des aires est égale à la section du tuyau (fig. 6, pl. 27). Par cette disposition, la prise de vapeur a lieu dans toute la longueur de la chaudière; alors l'abaissement de pression ayant lieu dans une grande étendue, l'ébullition est beaucoup moins tumultueuse, et il doit y avoir beaucoup moins d'eau entraînée que dans les dispositions ordinaires.

Cet appareil, imaginé par M. Ewbank, a été exécuté et a bien réussi. Les soupapes de sûreté doivent être en communication directe avec le tuyau. Il est évident que par une disposition analogue on rendrait plus exactes les indications des robinets-jauges (749).

886. On a proposé ensuite d'établir la prise de vapeur à l'extrémité A (fig. 7, pl. 27) d'un tuyau ABCD, qui plongerait jusqu'au fond de la chaudière, et communiquerait ensuite avec la tubulure de sortie, l'orifice A étant surmonté d'une plaque que l'on rapprocherait convenablement de cet orifice au moyen d'une tige à vis qui passerait à travers

une boîte à étoupe. Par cette disposition, l'orifice d'entrée de la vapeur dans le tuyau pouvant être plus petit que la section du tuyau, la vapeur, en y entrant, éprouvera une dilatation qui produira la vaporisation de l'eau entraînée à l'état liquide, et la vapeur se réchauffant en parcourant la partie BC du canal, pourra sortir saturée et sans eau. Je ne sais pas si cet appareil a été essayé; mais il est évident que pour qu'il produisît l'effet qu'on doit en attendre, il faudrait que l'orifice d'accès de la vapeur dans le tuyau eût une surface en rapport avec la quantité d'eau entraînée par la vapeur, ce qu'il serait bien difficile de déterminer pour une composition donnée d'un mélange d'eau et de vapeur; d'ailleurs cette surface devrait varier, car la composition du mélange varie à chaque instant. Cependant, si la chaudière avait une très-grande profondeur, cette disposition serait avantageuse pourvu, qu'on laissât l'orifice A complétement libre, parce que l'excès de température de l'eau, au fond de la chaudière, pourrait vaporiser, sinon la totalité, du moins une grande partie de l'eau entraînée.

887. On a proposé aussi de faire passer le tuyau d'écoulement de la vapeur à travers les carneaux qni entourent la chaudière et qui contiennent de la fumée à 300 ou 400°. Par cette disposition on vaporiserait une partie de l'eau entraînée; mais on pourrait aussi, si la quantité d'eau était très-petite, échauffer la vapeur, et envoyer à la machine de la vapeur dilatée, et à une température assez élevée pour brûler les garnitures des pistons ou des boîtes à étoupes.

888. La seule disposition dont l'usage soit absolument sans inconvénient, et dont l'expérience ait constaté l'efficacité, consiste (fig. 10, pl. 26) en un vase de fonte ou de cuivre, fermé de toute part, renfermant de l'eau jusqu'à une certaine hauteur, dans lequel la vapeur est amenée par un tuyau CD qui se prolonge dans le vase jusqu'à une distance égale à 30 centimètres du niveau de l'eau, et d'où elle sort ensuite par un tuyau qui s'ouvre sur le couvercle. Les globules d'eau renfermés dans la vapeur se précipitent dans l'eau et y restent, tandis que la vapeur s'échappe presque sèche. Un appareil à niveau d'eau fait connaître au chauffeur la hauteur du liquide dans le vase, et un tube qui retourne à la chaudière permet de n'y laisser que la quantité convenable. Cet appareil a été appliqué à une machine de trente chevaux et a donné de très-bons résultats.

889. On pourrait rendre le jeu de cet appareil beaucoup plus simple, et éviter la main-d'œuvre, en plaçant le vase en partie dans la chaudière, comme l'indique la figure 11 (pl. 26). Il faudrait alors percer la partie inférieure du vase d'un certain nombre d'orifices pour que le niveau de l'eau y fût sensiblement le même que dans la chaudière.

### § 8. — TUYAUX D'ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR.

890. Les tuyaux dont il est question sont destinés à conduire la vapeur de la chaudière, où elle se produit, dans le lieu où elle doit être utilisée, ou comme force motrice, ou comme moyen de chauffage. Dans tous les cas ces tuyaux doivent avoir des dimensions suffisantes pour conduire, dans un temps donné, un volume également donné de vapeur sous la pression qui existe dans la chaudière, et cela sans lui faire éprouver une trop grande détente.

On n'emploie jamais de tuyaux de plomb, parce que les mouvements qu'ils éprouvent par les variations de dilatation les détruisent rapidement. On se sert toujours de tuyaux de fer, et surtout de tuyaux de cuivre, dont les extrémités sont brasées sur des brides en fonte réunies par des écrous.

891. Les phénomènes qui accompagnent le mouvement de la vapeur dans un tuyau, sont très-compliqués, car il y a toujours condensation d'une partie de la vapeur par le refroidissement de la surface du tuyau, un frottement qui ralentit la vitesse, une détente partielle de la vapeur, et enfin un abaissement de température. Ces phénomènes n'ont point été étudiés par les géomètres, et il n'y a que peu d'expériences faites à ce sujet.

892. On peut cependant déterminer, avec une précision suffisante pour la pratique, deux limites du diamètre d'un tuyau par lequel doit s'écouler un poids connu de vapeur sous une certaine pression, en ne tenant pas compte de la vapeur qui est condensée, et en supposant successivement que la détente soit nulle ou complète. En effet, dans les deux cas, la vitesse étant constante dans le tuyau, en désignant par P la hauteur d'une colonne de vapeur qui ferait équilibre à la pression dans la chaudière, et dont la densité serait égale à celle de la vapeur dans la chaudière ou à celle de la vapeur sous la pression qui existe dans le lieu où

la vapeur s'écoule; par $v$ la vitesse d'écoulement; par L et D la longueur et le diamètre du tuyau d'écoulement, et enfin par $k$ le coefficient de frottement, on aura

$$P - \frac{v^2}{2g} = \frac{kL}{D} v^2 \ldots \quad (1)$$

et en désignant par V le volume de vapeur qui doit s'écouler par seconde, et par $r$ le rayon du tuyau, on aura

$$V = \pi r^2 v \ldots \quad (2)$$

alors en éliminant $v$ entre les équations (1) et (2), il viendra

$$r^5 = \frac{V^2(r + gkL)}{2gP\pi^2} = \frac{V^2(r + gkL)}{193P} \ldots \quad (3)$$

équation d'où l'on tirera une première valeur de $r$ en négligeant $r$ par rapport à $gkL$; valeur qui servira ensuite à en obtenir une deuxième plus approchée, et d'autres aussi approchées qu'on pourra le désirer.

893. Mais pour effectuer ces calculs, il faut connaître la valeur de $k$. Il est très-probable qu'il en est de la vapeur d'eau comme de l'air, que la valeur de $k$ est indépendante de la nature du tuyau, car la vapeur qui se condense mouille la surface intérieure du tuyau, et par conséquent le frottement a toujours lieu entre la vapeur et l'eau. La valeur de $k$ ne pourrait se déduire de l'observation qu'autant qu'on connaîtrait la loi de la détente; mais on peut déduire de l'expérience des valeurs de $k$ en faisant successivement les deux suppositions dont nous avons parlé; les deux nombres obtenus seront différents et ne représenteront certainement pas le coefficient de frottement, comme nous l'avons défini, mais seulement les valeurs d'une constante qui permettront d'obtenir des valeurs approchées du rayon du tuyau. Je ne connais qu'une seule expérience de laquelle on puisse déduire les valeurs de $k$ dont il est question : elle a été faite par M. Rudler, ingénieur de la manufacture des tabacs.

894. Un tube de 4 mètres de longueur et de $0^m,08$ de diamètre, adapté à une chaudière à vapeur, a laissé écouler dans l'air 4800 kilogrammes de vapeur en 3 heures, la pression moyenne de la vapeur dans la chaudière étant de $0^m,20$ de mercure.

Dans cette expérience le poids de la vapeur écoulée par seconde était de $4800 : 3 \times 3600 = 0^k,44$; son volume, en supposant la détente complète, était $0^k,44 : 0,00059 = 0^{m.c.},74$; on avait $v = 0^{m.c.},74 : 0,005 = 149$ mètres; et

enfin $P = 0{,}20 \times 13{,}59 : 0{,}00059 = 4610$ ; alors l'équation (1) donne

$$4610 - 1130 = \frac{k \times 4 \times 21904}{0{,}08}; \quad \text{d'où} \quad k = 0{,}0032.$$

En supposant qu'il n'y ait pas de détente, le volume de vapeur écoulée par seconde est $0{,}44 : 0{,}00072 = 0{,}61$ ; et on a $v = 0{,}61 : 0{,}0005 = 122$ ; $P = 0{,}20 \times 13{,}59 : 0{,}00072 = 3777$, et l'équation (1) devient

$$3777 - 744 = k \times 744200; \quad \text{d'où} \quad k = 0{,}0040.$$

895. D'après cela, les limites extrêmes du rayon du tuyau seront déterminées par les deux équations

$$r^5 = \frac{V^2(r + 0{,}031L)}{193P}, \quad \text{et} \quad r'^5 = \frac{V'^2(r' + 0{,}039L)}{193P'},$$

dans lesquelles V représente le volume de vapeur détendue qui doit s'écouler par seconde ; P l'excès de la pression intérieure sur la pression de l'espace dans lequel la vapeur s'écoule, en vapeur détendue à cette dernière pression ; V′ le volume de vapeur comprimé sous la pression de la chaudière, et P′ l'excès de pression estimé en vapeur comprimée.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de conduire 750 kilogrammes de vapeur par heure à une distance de 20 mètres, la tension de la vapeur dans la chaudière étant de trois atmosphères ; c'est la quantité de vapeur produite par une chaudière d'une machine de trente chevaux.

Le poids de la vapeur à faire écouler par seconde sera de $750^k : 3600 = 0^k{,}21$ ; et on aura $V = 0{,}21 : 0{,}0016 = 0^{mc}{,}13$ ; $P = 2 \times 0{,}76 \times 13{,}59 : 0{,}0016 = 12920$ ; $V' = 0{,}21 : 0{,}00059 = 0^{mc}{,}35$ ; $P' = 2 \times 0{,}76 \times 13{,}59 : 0{,}00059 = 35037$ ; et $L = 20^m$. Alors les deux équations précédentes deviennent

$$r^5 = \frac{0{,}017(r + 0{,}62)}{2493560}, \quad \text{et} \quad r'^5 = \frac{0{,}044(r' + 0{,}78)}{6762141}.$$

Après deux substitutions, on trouve $r = 0^m{,}0213$, et $r' = 0^m{,}0220$. Ainsi, le diamètre du tuyau est compris entre $0^m{,}0426$ et $0^m{,}044$.

Le même mode de calcul s'appliquera à tous les cas dans lesquels on connaîtra la tension de la vapeur dans la chaudière, et sa tension dans l'espace où elle se rend.

Si on connaissait la longueur et le diamètre du tuyau, ainsi que la tension de la vapeur dans la chaudière, et le poids de la vapeur qui s'écoule, on pourrait obtenir une valeur approximative de la différence de tension aux deux extrémités du tuyau, en calculant la valeur de P au

moyen de l'équation (3), dans laquelle on prendrait pour V le volume de la vapeur sous la pression qui existe dans la chaudière.

## § 9. — FOURNEAUX.

896. Dans ce paragraphe, nous ne nous occuperons que des fourneaux des chaudières à basse et à haute pression, de la forme indiquée dans les figures de la planche 15.

897. On désigne, ainsi que nous l'avons déjà dit, sous le nom de carneau, le canal dans lequel circule la fumée, au-dessous et autour de la chaudière, avant de se rendre dans la cheminée. C'est en parcourant les carneaux que l'air brûlé doit se refroidir jusqu'à 300°, température qui correspond au maximum de tirage. La forme et la longueur des carneaux ont une grande influence sur l'effet utile produit, du moins quand la combustion a lieu dans de bonnes conditions.

Plusieurs ingénieurs ont avancé que la circulation de l'air brûlé dans les carneaux était presque inutile. Les carneaux ont en effet peu d'influence quand la quantité d'air qui traverse le combustible est trop grande, parce qu'alors la température de l'air qui sort du foyer est peu considérable, et que le chauffage n'a lieu que par rayonnement; mais quand la combustion est alimentée par le volume d'air seulement nécessaire, la circulation de l'air brûlé dans les carneaux augmente beaucoup la quantité de vapeur produite.

898. Nous rapporterons à ce sujet une expérience faite par M. Valter. Dans une chaudière à deux bouilleurs, renfermant $13^{m},46$ de surface de chauffe, on a évaporé 1480 litres d'eau en cinq heures, par la combustion de 213 kilogrammes de houille. Chaque kilogramme de houille a produit environ 7 kilogrammes de vapeur, et la quantité de vapeur produite par heure et par mètre carré de surface de chauffe a été de $22^{k}$. En supprimant complétement la circulation de l'air chaud autour de la chaudière, et par conséquent en ne chauffant que les bouilleurs, la surface de chauffe était réduite à $8^{m},18$, et on a produit 1316 kilogrammes de vapeur en cinq heures, avec la même consommation de combustible; ainsi chaque kilogramme de houille a produit $6^{k},18$ de vapeur, et chaque mètre carré $32^{k},48$. Alors la surface de chauffe, placée dans les carneaux, a produit, dans la première expérience, 1480 — 1316

= 164 kilogrammes de vapeur en cinq heures, ou $32^k,78$ par heure, et chaque mètre carré $32,78 : 5^m,27 = 6^k,10$. Ainsi, les quantités de vapeur produites par heure et par mètre carré de la chaudière et des bouilleurs, étaient 32,48 et 6,10, et la chaudière ne produisait que $164 : 1480 = 0,11$ de l'effet total. M. Valter n'a pas déterminé la quantité d'oxygène libre qui se trouvait dans la fumée; mais il est probable qu'elle était considérable, et que si elle eût été seulement de 0,1, l'effet produit par les carneaux aurait été beaucoup plus grand.

899. Une commission de la Société industrielle du grand-duché de Hesse a fait dernièrement des expériences pour déterminer l'influence de la circulation de l'air brûlé autour des chaudières, en donnant aux carneaux différentes formes, et en employant différents combustibles. On s'est servi de la même chaudière, mais le fourneau a été modifié de différentes manières :

A. Le fourneau étant sans carneaux, la chaudière était librement suspendue au-dessus du foyer.

B. Le fond de la chaudière était seul exposé au rayonnement du foyer, et l'air brûlé circulait autour de la chaudière, une seule fois, dans un canal ayant toute la hauteur des faces latérales de la chaudière.

C. Le fond de la chaudière était chauffé par rayonnement, mais l'air brûlé faisait deux fois le tour de la chaudière, dans un canal ayant une hauteur deux fois plus petite que dans la disposition précédente.

D. Le foyer était surmonté d'une voûte garnie d'une large ouverture, par laquelle l'air brûlé arrivait sous le fond de la chaudière; il passait ensuite simultanément par tous les points du contour du fond de la chaudière, dans un canal annulaire qui régnait autour de la chaudière, d'où il s'échappait par plusieurs orifices percés dans la maçonnerie enveloppante pour arriver à la cheminée.

E. Le fond de la chaudière était chauffé par rayonnement, et l'air brûlé parcourait sa surface latérale, en se divisant dans deux carneaux qui se réunissaient au-dessus du foyer, et dont chacun n'avait par conséquent pour longueur que la moitié du contour de la chaudière.

F. Le fond de la chaudière était chauffé par rayonnement, et l'air brûlé parcourait simultanément deux carneaux placés de chaque côté, en revenant sur lui-même, de manière à se dégager au-dessus des orifices par lesquels il y était arrivé.

Le tableau suivant renferme les résultats obtenus; les chiffres indiquent les quantités de combustible employées pour produire le même effet dans le même temps, et par conséquent les plus élevés correspondent aux dispositions les moins avantageuses :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bois... | F | E | C | B | D | A |
| | 63 | 68,8 | 68,69 | 72,19 | 72,23 | 100 |
| Tourbe. | F | C | D | E | B | A |
| | 53 | 66 | 71 | 72 | 76 | 100 |
| Houille. | C | F | B | F | D | A |
| | 73 | 73 | 83 | 85 | 91 | 100 |

Il résulte de ces observations 1° que, quand l'air brûlé ne circule pas autour de la chaudière, l'effet utile est beaucoup plus petit que quand cette circulation a lieu d'une manière quelconque;

2° Que l'influence des carneaux est plus grande pour le bois et la tourbe que pour la houille, puisqu'on a économisé un tiers de combustible, avec le bois, par le chauffage latéral, presque moitié avec la tourbe, et seulement un quart avec la houille;

3° Que la disposition la plus avantageuse paraît être celle des doubles carneaux E et F;

4° Que les doubles carneaux C donnent, en général, de meilleurs résultats que les carneaux simples B.

900. On doit conclure des expériences que nous venons de rapporter, qu'en général l'influence des carneaux est très-grande, et que si elle est plus petite pour la houille que pour le bois et la tourbe, cela tient à ce que le rayonnement de la houille étant plus grand que celui des autres combustibles, l'air brûlé est à une température moins élevée, et aussi à ce que la combustion de la houille, n'étant pas toujours accompagnée de flamme, et l'épaisseur de la couche étant très-petite en général, il passe plus d'air sans altération. Quant à l'influence de la disposition des carneaux, on ne peut rien conclure des expériences rapportées en dernier lieu, parce que la consommation de combustible n'est pas le seul élément qui doive être pris en considération; il faudrait savoir si la combustion a eu lieu dans les mêmes conditions, et

par conséquent il faudrait connaître, pour chaque cas, la composition de l'air brûlé.

901. *Disposition des carneaux pour les chaudières à basse pression.* Dans ces appareils, l'air brûlé parcourt d'abord toute la partie inférieure de la chaudière, et fait ensuite le tour complet de la chaudière dans un carneau latéral. On donne ordinairement aux carneaux la section de la cheminée à son sommet; il n'y a cependant aucun inconvénient à donner une section beaucoup plus grande au canal qui règne sous la chaudière, parce que l'air brûlé, quand le canal est trop grand, ne s'écoule que par la partie supérieure, et toujours en restant en contact avec la chaudière. Cependant, si la courbure du fond des chaudières était très-grande, il y aurait de l'inconvénient à donner au carneau une trop grande hauteur; il serait même avantageux que sa section n'eût exactement que l'étendue convenable; et si cela était nécessaire, il faudrait donner au fond du carneau une surface convexe. Pour les chaudières cylindriques, il faudrait au contraire courber le fond du carneau, de manière que le courant d'air brûlé fût obligé de passer sur toute la surface de la chaudière.

Quant aux carneaux latéraux, il faut toujours leur donner le minimum de section, car s'ils étaient trop grands, le courant n'aurait lieu que dans la partie supérieure, et on perdrait une grande partie de la surface de chauffe.

902. On a reconnu par expérience que si on faisait revenir l'air brûlé en avant simultanément par les deux faces latérales, l'air brûlé ne se distribuait pas également dans les deux carneaux, et que s'ils étaient trop grands, il n'en parcourait qu'un seul, celui qui présentait le moins de résistance. C'est une disposition qu'il ne faudrait employer qu'autant que la cheminée serait placée à côté de la porte du fourneau; mais il faudrait disposer, dans les deux carneaux, des registres que l'on réglerait par tâtonnement, de manière à diviser également la fumée entre eux.

On n'a fait aucune expérience sur une grande échelle pour connaître l'influence des doubles circuits; on peut seulement prévoir qu'ils augmenteraient beaucoup la résistance en diminuant l'étendue de la surface de chauffe de toute l'épaisseur de la maçonnerie qui séparerait les circuits. On ne les emploie jamais.

903. Souvent on donne aux carneaux des chaudières à basse pression des dimensions beaucoup trop grandes, et qui sont déterminées par la condition de permettre d'y introduire un enfant pour nettoyer la surface extérieure des chaudières. Mais comme les carneaux peuvent être nettoyés avec un ringard, dont on augmente à volonté la longueur du manche, par des tiges qui s'ajustent les unes au bout des autres, et que des carneaux trop grands ont l'inconvénient de n'être parcourus qu'à la partie supérieure par l'air chaud, il faut toujours éviter, comme nous l'avons déjà dit, de leur donner une trop grande section.

904. On a proposé de placer sur le fond du carneau qui règne au-dessous de la chaudière, des cloisons transversales, destinées à changer plusieurs fois la direction du courant; cette disposition diminue l'étendue de la surface de chauffe, concentre le rayonnement du foyer sur une plus petite partie de la chaudière, et ne permet pas de nettoyer facilement le fond de la chaudière, aussi a-t-elle été complétement abandonnée.

905. La limite supérieure de la surface de chauffe latérale doit toujours être, de quelques centimètres, inférieure au niveau de l'eau, attendu que la partie de la chaudière qui serait chauffée extérieurement, et qui ne serait pas mouillée intérieurement, pourrait s'échauffer même jusqu'au rouge; circonstance qui, comme nous le verrons plus loin, est une cause imminente d'explosion.

906. Les carneaux latéraux doivent être garnis, à une des extrémités, d'une ouverture, ordinairement fermée ou par des briques ou par des plaques de tôle ou de fonte, destinée à introduire un ringard pour enlever de temps en temps la suie qui s'accumule contre la surface des chaudières, et qui diminue beaucoup la quantité de chaleur transmise.

907. *Disposition des carneaux dans les appareils à haute pression.* Tout ce que nous avons dit relativement aux chaudières à basse pression, est applicable aux chaudières à bouilleurs; nous avons seulement une observation à faire relativement à la position de la voûte qui sépare le carneau des bouilleurs de ceux de la chaudière.

Dans les anciennes chaudières, la voûte passait par le milieu des bouilleurs; mais par cette disposition on perdait complétement comme surface de chauffe la moitié de la surface des bouilleurs, parce que leur partie supérieure se trouvait à la partie inférieure des carneaux placés

au-dessus où l'effet produit par le courant d'air brûlé est très-faible. Maintenant on place la voûte au-dessus des bouilleurs. Cette utile modification dans la construction des fourneaux a été faite, pour la première fois, par M. Valter.

Il est toujours très-utile de donner aux carneaux une hauteur telle qu'on puisse sortir les bouilleurs du fourneau, sans déranger la chaudière, quand on est obligé de les réparer ou de les changer.

908. *Maçonnerie.* Les fourneaux se construisent en briques; l'intérieur du foyer et le carneau qui le suit doivent toujours être en briques réfractaires liées entre elles par de la terre à brique; pour le reste du fourneau, on peut employer des briques ordinaires réunies par du mortier à sable siliceux.

Il est utile, même pour l'économie des frais de construction, d'établir au-dessous du carneau qui se trouve au-dessous de la chaudière ou des bouilleurs, un espace voûté fermé de toute part, pour diminuer la transmission de la chaleur dans le sol.

909. On élève toujours la maçonnerie à la hauteur des tubulures qui portent les différents appareils de niveau, de sûreté, d'alimentation et d'écoulement de la vapeur, afin de diminuer la quantité de chaleur perdue par le rayonnement de la partie supérieure de la chaudière, et par son contact avec l'air. A la manufacture des tabacs de Paris, la maçonnerie ne s'élève que d'une petite quantité au-dessus des carneaux, et les chaudières sont enveloppées d'une toile d'emballage grossière, mais serrée, qui repose sur un châssis en fer; le feu y a pris deux fois, après l'abaissement du registre, par la combustion d'une certaine quantité de gaz combustible formé dans le foyer, et qui s'était échappé par les fissures qui existent toujours entre la chaudière et la maçonnerie. Ainsi, cette disposition a de graves inconvénients et ne doit pas être recommandée.

910. On emploie rarement une seule chaudière, du moins quand le travail ne doit pas éprouver d'intermittence.

Dans les grands appareils il y a toujours trois ou quatre chaudières quand deux ou trois suffisent. On les place toujours à côté les unes des autres, afin de diminuer la perte de chaleur par les parois libres. Mais il est utile de ne pas les rendre solidaires, et de les isoler les unes des autres par des intervalles vides fermés de toute part.

911. *Armatures.* La dilatation des briques et l'absence presque complète de liaison entre elles produisent dans les fourneaux des mouvements qui ne sont point accompagnés de retrait pendant le refroidissement, et qui à la longue les déforment complétement. Ces effets sont surtout produits dans les fourneaux qui renferment des voûtes; les dilatations augmentent les poussées sur les culées, les voûtes s'aplatissent et souvent s'écroulent. Pour prévenir la prompte détérioration des fourneaux, on les garnit souvent de tiges et de plaques de fer et de fonte qu'on désigne sous le nom d'*armatures*, et qui ont pour objet de s'opposer aux mouvements qui tendent à se produire.

Quand le fourneau est circulaire, des cercles de fer serrés par des clavettes et enveloppant des tiges verticales de fer ou de fonte, appliquées contre la maçonnerie, forment le meilleur système d'armature qu'on puisse employer.

Quand les fourneaux ont une forme rectangulaire, cette disposition des armatures serait sans efficacité. Alors on pourrait soutenir les faces de devant et de derrière par de larges plaques de fonte, maintenues par des tiges de fer taraudées aux extrémités et serrées par des boulons; et les flancs des fourneaux par des tiges de fer ou de fonte fixées par la partie inférieure dans les fondations, et reliées entre elles, au-dessus de la chaudière, par des tiges de fer transversales, serrées par des boulons. Mais les chaudières à vapeur sont rarement munies d'armatures. Quand elles sont isolées, ce qui a rarement lieu, on donne une grande épaisseur aux murailles extérieures, pour éviter la perte de chaleur par le refroidissement des faces, épaisseur qui suffit pour les faire résister aux poussées intérieures; quand elles sont au nombre de deux ou trois, ce qui est le plus ordinaire, elles sont adossées les unes aux autres, et entourées de trois côtés de murailles épaisses, alors la déformation des fourneaux n'est possible que sur les faces de devant, et par la poussée de la voûte du canal qui passe sur le devant de la chaudière; rarement on oppose des armatures à cette poussée, et dans presque toutes les constructions on la détruit par une épaisseur convenable du mur qui se trouve en avant, et que l'on soutient ou par une plaque de fonte ou par une voûte, afin de ne pas trop éloigner la porte de l'arête antérieure de la grille.

On pourrait aussi, pour consolider la maçonnerie, employer les

armatures dont nous avons parlé à l'occasion des cheminées (446).

912. Les chaudières à vapeur doivent être établies dans des circonstances déterminées par les règlements qui font le sujet du paragraphe suivant.

### § 10. — RÈGLEMENTS RELATIFS AUX CHAUDIÈRES A VAPEUR.

913. Par un décret du 15 octobre 1810, les établissements industriels ont été divisés en trois classes. La première classe comprend les établissements qui doivent être éloignés des habitations; la seconde ceux dont l'éloignement des habitations n'est pas indispensable; et enfin la troisième ceux qui peuvent être placés sans inconvénients auprès des maisons habitées.

Pour les établissements de la première classe, la demande doit être adressée au préfet et affichée dans un rayon de cinq kilomètres; le conseil de préfecture donne son avis sur les oppositions, et le conseil d'État décide.

Pour les établissements de deuxième classe, la demande est adressée au sous-préfet, et renvoyée au maire qui procède à une information de commodo et incommodo; les pièces sont renvoyées au préfet qui juge, sauf recours au conseil d'État.

Pour les établissements de troisième classe, la permission du maire suffit.

914. L'ordonnance du 29 octobre 1823 assimile les chaudières à vapeur à haute pression aux établissements de deuxième classe, et celles à basse pression aux établissements de troisième classe.

915. D'après les ordonnances qui ont paru successivement sur cet objet, les chaudières ne peuvent être établies qu'autant qu'elles satisfont aux conditions suivantes.

Pour les chaudières à basse pression dans lesquelles la pression de la vapeur ne dépasse pas deux atmosphères:

1° Les chaudières devront porter deux soupapes de sûreté de même section, dont les orifices seront déterminés par la formule (799); chacune d'elles sera chargée directement, et sans l'intermédiaire d'un levier, d'un poids de $1^k,033$ par centimètre carré.

2° Chaque chaudière devra être pourvue d'une plaque fusible à 127°,

dont la surface libre sera quatre fois plus grande que celle de chacune des soupapes.

3° La plaque fusible et l'une des soupapes seront placées sous une même grille, dont la clef ne sera pas à la disposition du chauffeur.

4° Chaque chaudière sera munie d'un manomètre à air libre, dont les indications ne pourront pas dépasser 2 atmosphères.

916. Pour les chaudières à haute pression, dans lesquelles la tension de la vapeur dépasse 2 atmosphères :

1° Les chaudières en tôle et en cuivre auront la même épaisseur, et cette épaisseur sera au moins égale à celle qui résulte de la formule (741). Les chaudières de fonte sont prohibées.

2° Les chaudières doivent avoir été essayées à l'aide d'une presse hydraulique, à froid et sous une pression trois fois plus grande que celle sous laquelle elles doivent fonctionner; et elles doivent être timbrées à la pression déclarée.

3° Les chaudières doivent être pourvues de deux soupapes de sûreté, dont une couverte d'une grille; les diamètres et les charges des soupapes étant déterminés par les formules (799) et (803).

4° Elles devront être garnies de deux plaques fusibles, l'une à 10°, l'autre à 20° au-dessus de la température correspondante à la pression habituelle; la première d'une surface libre au moins égale à celle des soupapes de sûreté, la seconde d'une surface quadruple; ces rondelles, dont l'épaisseur sera de $0^m,015$, seront timbrées.

5° Les chaudières devront être placées dans un local dont la capacité soit au moins égale à vingt-sept fois celle de la chaudière. Le local devra être éclairé au moins de deux côtés par de larges baies de croisées, fermées de châssis légers et ouvrant en dehors; il ne pourra être contigu aux murs mitoyens avec les maisons voisines; il devra toujours en être séparé à la distance de deux mètres par un mur d'un mètre d'épaisseur au moins. Il devra aussi être séparé par un mur de même épaisseur de tout atelier intérieur. Il ne pourra exister d'habitation ni d'atelier au-dessus de ce local.

Les ingénieurs des mines et des ponts et chaussées sont chargés des épreuves des chaudières et de la surveillance des établissements.

## § 11. — CONDUITE DE L'OPÉRATION.

917. L'alimentation des foyers des chaudières à vapeur est confiée à des ouvriers désignés sous le nom de chauffeurs. Cette opération exige, de la part du chauffeur, du soin et de l'intelligence, d'autant plus qu'il doit en même temps surveiller les appareils de sûreté, les indicateurs de niveau et l'appareil d'alimentation de la chaudière.

918. L'alimentation du foyer doit être régulière et se faire à des intervalles égaux avec le même poids de combustible. Des alimentations trop fréquentes ont l'inconvénient d'introduire dans le foyer une trop grande quantité d'air froid par la porte qui reste nécessairement ouverte pendant toute la durée du chargement. Une épaisseur trop grande ou trop petite de la couche de combustible, des morceaux trop gros ou trop menus ont l'inconvénient de diminuer l'effet utile du combustible, ou par le passage à travers le foyer d'une grande quantité d'air inutile à la combustion, ou par la distillation d'une partie du combustible ou la formation d'une certaine quantité d'oxyde de carbone. Ainsi, ce n'est que par des observations suivies que le chauffeur parviendra à reconnaître, d'après la grandeur de la grille, le tirage de la cheminée, la nature du combustible et la grosseur des morceaux, les conditions les plus favorables à l'économie du combustible.

919. On a proposé d'abaisser, en partie du moins, le registre de la cheminée quand on ouvre la porte pour charger la grille; cet abaissement a en effet l'avantage de diminuer la quantité d'air froid qui passe dans les carneaux sans alimenter la combustion; mais les gaz qui se produisent dans le foyer ne sont pas brûlés, et l'appel d'air extérieur qui se produit aussitôt qu'on ouvre le registre, peut donner lieu à des explosions dans les carneaux; ainsi ce n'est pas une manœuvre à recommander.

920. Les houilles produisant toujours des scories plus ou moins adhérentes aux barreaux, il faut soulever ces scories de temps en temps au moyen d'une tige de fer recourbée que l'on introduit en dessous à travers les barreaux, et, après un certain temps, il faut les enlever de la grille; cette opération s'effectue en laissant tomber le feu et en nettoyant la grille.

921. Le manomètre doit être constamment surveillé; si la pression dépassait la limite assignée, il faudrait modérer la combustion en abaissant le registre, en fermant plus ou moins la porte du cendrier, ou en ouvrant en partie la porte du foyer. Le chauffeur doit soulever de temps en temps les soupapes de sûreté, pour s'assurer qu'elles n'adhèrent pas à leurs siéges; mais cette opération doit être rare, attendu que les dépôts de l'eau, entraînés par la vapeur, salissent les surfaces qui doivent être en contact, et s'opposent à la fermeture complète des soupapes. Dans aucun cas et pour aucune raison, les soupapes ne doivent être surchargées.

922. L'attention du chauffeur doit surtout se porter sur les indicateurs de niveau et sur l'appareil d'alimentation, car presque toutes les causes d'explosion résultent d'un abaissement de niveau dans la chaudière. Le tube indicateur et le flotteur doivent être souvent observés; l'immobilité de l'aiguille de ce dernier, dans un point intermédiaire de la graduation, serait un indice certain que le fil de suspension du flotteur est trop serré dans la boîte à étoupe, et que l'appareil ne fonctionne pas; il faudrait alors desserrer l'écrou qui presse les étoupes. Si l'aiguille restait immobile à l'une des extrémités du cadran, le niveau serait trop haut ou trop bas; dans le premier cas, en tournant le robinet du tuyau d'alimentation, on diminuerait la quantité d'eau introduite à chaque instant dans la chaudière, et on ramènerait en peu de temps le niveau à la hauteur normale. Dans le second cas, si l'abaissement du niveau était considérable, la partie de la chaudière qui se trouve au-dessus de l'eau pourrait être rouge, et il y aurait le plus grand danger à remonter le niveau. Le seul parti à prendre serait alors de diminuer l'activité du foyer en ouvrant la porte, et de s'éloigner du fourneau; une explosion serait à craindre.

923. Si l'abaissement du niveau était peu considérable et n'était pas arrêté par une plus grande ouverture du robinet du tuyau d'alimentation, il proviendrait d'un dérangement dans la pompe ou dans l'appareil d'alimentation. Si on pouvait obvier promptement à cet accident, on pourrait ne pas interrompre le chauffage; mais si les réparations devaient exiger un certain temps; si, par exemple, l'arrêt de la pompe provenait de l'encrassement des soupapes, d'une fissure dans le tuyau d'aspiration, il faudrait faire tomber le feu et arrêter le chauffage.

924. Une circonstance qui a une grande influence sur l'altération des

chaudières, et qui peut même être une cause immédiate d'explosion, c'est l'adhérence que prennent entre eux et avec la surface intérieure de la chaudière les dépôts produits par l'eau d'alimentation. Ces dépôts forment des croûtes épaisses sur le métal, en diminuent la conductibilité, permettent à sa surface extérieure de rougir quand elles recouvrent la partie inférieure de la chaudière; alors le métal devient moins résistant, s'oxyde facilement; et si ces croûtes, par une cause quelconque, viennent à se détacher, elles mettent l'eau en contact avec le métal incandescent, circonstance qui paraît être une de celles qui produisent les explosions.

925. Ces dépôts varient avec la nature des eaux dans des limites très-étendues, et, pour certaines eaux, ils sont considérables. D'après des expériences faites sur de l'eau d'un puits, à Paris, 100 kilog. d'eau laissent, en s'évaporant, $0^k,18$ de résidu; alors, pour une machine à basse pression de 20 chevaux, dont la consommation de vapeur par heure serait de 600 kilog., le dépôt par heure serait de $1^k,08$, par 24 heures de $25^k,92$, et, pour un travail continu de 1 mois, de $777^k,60$. L'eau de Seine donne un dépôt qui n'est que de $0^k,0186$ par 100 kilog., et pour la même machine et pour le travail de 1 mois, le dépôt ne serait que de 80 kilog. L'eau de l'Oise donnerait un résidu de 20 kilog.; et celle de l'Ourcq un résidu de 120.

Dans une chaudière à bouilleurs, de la fabrique de céruse de Clichy, après trois semaines d'un travail de dix heures par jour, les incrustations avaient 5 centimètres d'épaisseur. La partie inférieure des bouilleurs ne durait pas au delà de huit à dix mois. Une chaudière de la forme de Watt donnait les mêmes résultats.

926. Pour éviter l'influence d'une trop grande épaisseur de ces incrustations, on est obligé d'interrompre de temps en temps le travail des chaudières, de laisser refroidir le fourneau, d'enlever les dépôts non adhérents, et de détacher au marteau, par un travail long et pénible, les croûtes qui tapissent la surface intérieure des chaudières. Lorsque ces dépôts renferment beaucoup de carbonate de chaux, on facilite le nettoyage en introduisant dans la chaudière de l'acide chlorhydrique, qui dissout le carbonate de chaux et détruit l'adhérence des dépôts.

927. Les dépôts dont il est question ne peuvent être évités qu'en ali-

mentant les chaudières avec de l'eau distillée; et c'est une chose possible dans un grand nombre de cas, du moins quand la vapeur est employée au chauffage. Mais on peut diminuer l'adhérence des dépôts de manière à pouvoir nettoyer les chaudières par de simples lavages, en mêlant à l'eau différentes substances.

928. On a d'abord proposé d'employer des pommes de terre et du son; ces matières s'interposent dans les dépôts et ne leur permettent pas de prendre de l'adhérence; ils forment alors, au fond des chaudières, des masses boueuses qu'on enlève facilement par de simples lavages. Mais ces matières doivent nécessairement donner à l'eau une certaine viscosité, et par suite favoriser le mélange de l'eau à la vapeur. En outre, lorsqu'elles ne sont pas bien délayées dans l'eau, elles se déposent au fond, et peuvent provoquer l'échauffement au rouge de la chaudière, et produire ainsi l'effet qu'elles doivent éviter.

929. Nous rapporterons ici une observation assez remarquable faite par M. Gourlier, inspecteur des travaux de la Bourse, qui fait voir combien la présence des corps étrangers dans les chaudières facilite leur détérioration. Peu de jours après la mise en activité de la chaudière à vapeur destinée à chauffer la Bourse, on s'aperçut qu'elle était percée au fond; on arrêta le feu, et on reconnut, après avoir vidé la chaudière, que le métal était brûlé dans un endroit où s'était déposé un chiffon qui avait été oublié dans la chaudière lors de son établissement.

930. M. Chaix, en 1836, a proposé, pour éviter l'adhérence des dépôts, d'introduire dans les chaudières une certaine quantité d'argile plastique. Un grand nombre d'expériences ont constaté l'efficacité de ce procédé; l'argile, interposée dans les dépôts, détruit complétement toute adhérence, et il suffit de laver les chaudières à grande eau, après certains intervalles; opération qui n'exige pas que les fourneaux soient refroidis.

La priorité de cette invention n'appartient pas à M. Chaix ; car, dans le Manuel du manufacturier, publié par M. Pelouze, en 1826, on trouve le passage suivant :

« Quand le dépôt qui se forme dans les chaudières est de nature séléniteuse, on prévient la trop grande adhérence du sulfate de chaux par l'emploi d'une certaine quantité de terre argileuse qui, en se mêlant avec lui, détruit sa solidité. »

931. Tous les ingénieurs de la marine ont rendu le compte le plus favorable de l'emploi de l'argile dans les chaudières de bateaux à vapeur. Voici en outre les résultats de plusieurs expériences faites par une commission de la Société d'encouragement dans les ateliers de M. Cavé, sur la chaudière d'une machine de 10 chevaux. On a introduit dans la chaudière 20 kilog. d'argile délayée dans l'eau, et, après 8 jours de travail, il n'y avait aucune incrustation; de sorte qu'un simple lavage, qui dura une demi-heure, suffit pour mettre la chaudière en état. L'expérience fut répétée, mais prolongée pendant quinze jours, et les résultats furent les mêmes. Une troisième expérience, faite sur une autre chaudière, réussit également.

932. L'emploi de l'argile a cependant un très-grand inconvénient; il faut que cette substance soit introduite dans la chaudière, délayée dans un grand volume d'eau; car si on l'introduit en masse ou en pâte épaisse, elle se dépose au fond de la chaudière et la fait rougir. Le même effet a lieu lorsqu'une chaudière reste en repos pendant plusieurs jours.

Pour employer l'argile dans des circonstances favorables, il faudrait l'introduire d'une manière continue avec l'eau d'alimentation elle-même, et ne pas laisser longtemps l'eau en repos dans la chaudière quand elle ne produit pas de vapeur.

933. Nous rapporterons un extrait d'un rapport adressé au ministre de la marine, sur l'emploi de l'argile dans les chaudières à vapeur des bâtiments de l'État, par M. Delessaux, capitaine de vaisseau :

« L'emploi de l'argile continue à donner des résultats assez avantageux; mais il faut, pour en obtenir le plus d'efficacité possible, que cette argile parvienne dans les chaudières à son plus haut degré d'épuration, sans quoi l'adhérence des sels continue d'avoir lieu, quoique cependant par couches moins épaisses et beaucoup plus faciles à détacher que si on ne se servait pas de ce procédé. Il est donc à désirer qu'on délivre toujours cette argile pour le service des chaudières dans les conditions indiquées, et non brute et chargée de matières siliceuses.

« Parmi les moyens essayés pour introduire cette terre dans les chaudières, celui des boîtes en tôle fixées sur les cloisons intérieures des chaudières, qui n'était pas sans inconvénient, a fait place à celui plus ingénieux de M. Campaignac, ingénieur au corps royal du génie maritime, qui,

en faisant disparaître ces inconvénients, réunit l'avantage de continuer avec économie l'usage de l'argile, quelle que soit la durée de la traversée du bâtiment. Comme ce moyen peut ne pas être connu, j'en donne plus bas la description.

« Un autre moyen qu'on a trouvé également favorable pour vaincre l'adhérence des sels, c'est d'attendre le refroidissement de l'eau dans les chaudières avant de les vider. Ce moyen ne retarde qu'un peu le moment du nettoyage, et ne donne pas la peine de vider les chaudières à bras d'hommes. Dans ce dernier cas, il convient de se servir de la pompe à bras qui, par une ouverture convenable de ses robinets, permet de refouler l'eau directement dans la mer. Autrement, si on la laisse écouler dans la cale pour la pomper ensuite par les pompes au pied du grand mât, cette eau finit ensuite par infecter tous les fonds du navire, et salit singulièrement les parties du pont sur lesquelles elle se répand.

« Dans le nouveau mode de M. Campaignac, adopté sur les bâtiments à vapeur du port de Toulon, pour injecter l'argile dans les chaudières, on dispose de l'une quelconque des pompes de service des machines; mais la pompe d'épuisement dans la cale est celle qui se prête le mieux à cette installation; elle est moins susceptible de dérangement et plus facile à visiter.

« Le bassin en cuivre contenant l'argile délayée est placé dans la coursive entre les deux machines, sous l'une des plaques mobiles du parquet en fonte. Ce bassin a un double fond ou crible à travers lequel l'argile déjà épurée se débarrasse des racines ou autres corps étrangers qu'elle pourrait encore renfermer. Le tuyau d'aspiration de la pompe d'épuisement, qui est aussi muni d'une lanterne ou crépine, plonge sous le crible à quelque distance du fond du bassin où les parties siliceuses peuvent se déposer. On peut suppléer ainsi à une épuration très-imparfaite de l'argile.

« Le tuyau d'aspiration de la pompe d'épuisement porte donc une double branche, et, au moyen de deux robinets, cette pompe aspire à volonté dans la cale ou dans le bassin contenant de l'argile. Le tuyau d'épuisement de la même pompe est embranché avec le tuyau de la pompe à bras servant à remplir et à vider la chaudière, ou bien avec le tuyau des pompes d'alimentation, et, au moyen de deux autres robinets, l'eau de la cale sera refoulée à la mer, ou l'eau chargée d'argile aspirée

dans le bassin sera injectée dans la chaudière. Cette pompe, ainsi disposée, ne sera employée à ce dernier usage que pendant quelques instants, au moment des extractions nécessaires pour diminuer la concentration du sel marin en dissolution dans l'eau de la chaudière, et seulement pour y entretenir la dose d'argile convenable, ce dont il sera facile de juger par l'inspection des tubes indicateurs du niveau ou de l'eau recueillie des robinets-jauges.

« L'injection de l'argile se fait à l'eau chaude, en mettant le bassin qui la renferme en communication avec la bâche de la pompe à air, à l'aide d'un tube et d'un robinet. On se ménage ainsi la ressource précieuse d'une troisième pompe d'alimentation, dans le cas où l'une des deux pompes destinées à ce dernier emploi viendrait à se déranger. »

934. Pour éviter les incrustations, on a aussi employé les résidus des bois de teinture; les copeaux en s'interposant dans les dépôts préviennent leur adhérence; et ces matières, même après un repos très-long, ne forment sur le fond des chaudières que des masses très-divisées, à travers lesquelles l'eau circule facilement, et qui ne peuvent donner lieu à aucun accident. Mais ces matières sont quelquefois entraînées par la vapeur jusque dans le corps de pompe de la machine. Dans les ateliers des messageries Laffitte et Caillard, on a eu l'idée de remplacer les copeaux de bois de teinture par des extraits de ces bois, et les résultats ont dépassé toutes les espérances; les incrustations ont complétement cessé, les dépôts sont devenus pulvérulents et se sont réunis en totalité à la partie inférieure des bouilleurs; il paraît que la matière colorante, entraînée par les dépôts, s'est opposée à leur adhérence. Pour une machine de 16 chevaux alimentée par des eaux de puits, on emploie 1 kilogramme d'extrait solide de bois de campêche par semaine; cette matière est introduite successivement dans la bâche d'alimentation; la dépense par semaine est de 6 francs. Il est probable qu'on parviendrait au même résultat en employant beaucoup d'autres extraits d'un prix moins élevé.

935. Dans les chaudières des bâtiments à vapeur qui naviguent sur mer, il se forme des incrustations beaucoup plus considérables que dans les chaudières qui sont alimentées par l'eau douce; et pour éviter de trop grands dépôts, on est obligé, de temps en temps, de vider en partie la chaudière, afin que l'eau n'atteigne pas le point de saturation. Cette opération s'exécute par les chauffeurs sans qu'ils aient aucune règle pour

déterminer les époques auxquelles il convient de faire écouler de l'eau, et le temps pendant lequel le robinet de décharge doit rester ouvert. M. Seaward a proposé un moyen très-simple pour reconnaître à chaque instant le degré de saturation de l'eau, et par conséquent les époques convenables pour les évacuations partielles de l'eau de la chaudière. Le moyen dont il est question consiste à disposer un tube de verre comme ceux qui sont employés pour reconnaître le niveau de l'eau dans les chaudières, mais qui communiquerait par ses deux extrémités avec la chaudière, en deux points situés au-dessous du niveau habituel de l'eau; le refroidissement de l'eau renfermée dans le tube produirait une circulation assez rapide pour que l'on pût regarder à chaque instant l'eau du tube comme ayant une densité peu différente de celle de l'eau de la chaudière. Le tube renferme des boules de différentes densités comprises entre celle de l'eau de mer bouillante et celle de l'eau de mer bouillante saturée de sel; le nombre des boules qui se trouvent à la partie supérieure du tube indique le degré de saturation de l'eau (fig. 18, pl. 18).

936. M. Vilson a imaginé d'effectuer d'une manière continue le renouvellement de l'eau, en profitant de la chaleur qu'elle renferme pour chauffer l'eau d'alimentation. L'eau s'écoule constamment à la partie inférieure de la chaudière, où elle est plus chargée de sel, par un tuyau garni d'un robinet, ouvert de telle manière que le volume d'eau écoulé soit égal au volume d'eau saturé qui correspond à la quantité de vapeur formée dans le même temps. Le tuyau d'écoulement se divise ensuite en cinq branches placées dans le tuyau d'alimentation.

937. Mais malgré tout le soin qu'on peut mettre au nettoyage des chaudières, le métal s'oxyde, et son épaisseur diminue avec le temps, surtout dans les parties qui reçoivent le rayonnement du foyer; aussi les chaudières et les bouilleurs, dans les circonstances ordinaires, éprouvent des altérations très-différentes. Il serait alors important de visiter souvent les parties des bouilleurs qui se trouvent au-dessus du foyer; on pourrait même facilement mesurer de temps en temps l'épaisseur de la tôle au moyen d'un compas courbe à quatre branches. Pour les chaudières on ne pourrait mesurer l'épaisseur du métal qu'en y perçant, de distance en distance, de petits trous qu'on boucherait ensuite avec des rivets.

938. Sous le rapport de leur altération au feu, on observe de grandes différences entre des chaudières de même forme placées dans les mêmes circonstances. Souvent les bouilleurs se détériorent en très-peu de temps, d'autres fois ils n'éprouvent point d'altération, même après un très-long travail. Je citerai comme exemple une chaudière à bouilleurs établie dans la raffinerie de sucre de M. Bayvet; cette chaudière fonctionne depuis douze ans sans avoir éprouvé la moindre altération. Il est probable que ces différences proviennent de la nature de la tôle; celle qui est faite au charbon de bois est préférable à celle qui a été travaillée au coke, parce qu'elle ne renferme point de soufflure et n'est pas feuilletée.

939. Les chaudières s'altèrent aussi par les fuites à cause de l'oxydation que l'eau fait éprouver au métal. Quand les fentes sont légères, on peut arrêter les fuites en introduisant dans la chaudière 20 à 25 litres de gros son avec une petite quantité de chaux; l'amidon forme avec la chaux une espèce de mastic qui vient se déposer dans les fentes. Après, il faut nettoyer les chaudières, parce que la chaux formerait des incrustations.

940. Les chaudières doivent aussi, de temps en temps, être nettoyées extérieurement. Il faut enlever la suie qui les recouvre, et qui diminue notablement la quantité de chaleur qu'elles transmettent; les portes qui se trouvent à l'extrémité des carneaux rendent cette opération facile à exécuter. Ordinairement on enlève la suie au moyen d'un racloir fixé à l'extrémité d'une barre d'une longueur suffisante, ou avec une brosse métallique; et quand les carneaux ont une section suffisante, l'opération s'exécute par des enfants, mais il faut pour cela que le fourneau soit complétement refroidi, condition que n'exige pas le premier mode d'opération. Le nettoyage extérieur des chaudières s'exécute ordinairement tous les huit jours; pendant les premiers jours qui suivent, on s'aperçoit d'une augmentation notable d'effet utile.

941. Lorsqu'on brûle du bois ou de la tourbe, on parvient très-facilement à nettoyer les carneaux en y faisant passer un courant de vapeur.

## § 12. — DIFFÉRENTES DISPOSITIONS DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

942. Avant d'examiner les différentes dispositions des chaudières à vapeur qui ont été employées ou seulement proposées, nous décrirons un système complet de chaudière.

943. Les planches 29, 30, 31 et 32 représentent différentes coupes et les détails les plus essentiels du système de chaudières à vapeur de la manufacture des tabacs de Paris. Les chaudières sont à basse pression; elles sont placées sous un hangar dont la charpente est en fer et la couverture en zinc. Des quatre chaudières trois seulement sont constamment chauffées, et une est en nettoyage ou en réparation. Les trois chaudières en activité alimentent deux machines, chacune de 40 chevaux, et différents appareils de chauffage et de dessiccation; elles produisent une quantité de vapeur qui serait suffisante pour une machine de 100 chevaux. La pression de la vapeur dans les chaudières ne dépasse jamais celle de l'atmosphère de plus de $0^m,20$ de mercure. La surface de chauffe de chacune d'elles est de 36 mètres carrés.

$a,a,a,a$, chaudières en tôle de fer qui renferment chacune un tuyau intérieur de $0^m,68$ de diamètre, par lequel l'air brûlé, après avoir parcouru le fond de la chaudière, revient en avant, pour faire ensuite le tour complet de la chaudière en chauffant les faces latérales. $x$ représente le canal par lequel l'air brûlé qui a circulé autour de la chaudière gagne la cheminée commune. Les fonds des chaudières ont $0^m,011$ d'épaisseur, les flancs et le tube intérieur 0,008, et les dômes 0,006.

Comme le hangar sous lequel les générateurs sont établis n'est pas fermé, pour éviter la condensation de la vapeur sur les dômes des chaudières, on les a enveloppés de châssis en fer sur lesquels on a fixé des toiles d'emballage recouvertes d'une toile serrée (910).

Chacune des chaudières est garnie intérieurement de cinq barres de fer, qui s'opposent à sa déformation; trois maintiennent les flancs, et deux les extrémités (fig. I^re^ et 2, pl. 32). Chaque chaudière est percée de huit ouvertures. La première $b$, pour le trou d'homme. La seconde $c$, pour la colonne d'alimentation. La troisième $d$, pour recevoir la boîte à étoupe de la tige du flotteur; la figure 3 représente cette boîte sur une plus grande échelle; la caisse qui l'enveloppe a pour objet

d'éviter que l'huile ne se répande sur les chaudières. La quatrième *e*, est destinée à recevoir le tuyau d'écoulement de la vapeur. La cinquième *f*, reçoit le tuyau de vidange, représenté sur une plus grande échelle figures 4 et 5. Les sixième et septième établissent les communications de l'eau et de la vapeur avec le tube indicateur du niveau de l'eau. Enfin la dernière reçoit le manomètre *k*.

Les colonnes alimentaires *l*, *l*, *l*, *l*, des quatre chaudières (pl. 29 et 30) sont terminées chacune à leur extrémité supérieure par une cuvette *r* qui renferme une soupape, reliée par un balancier à la tige de suspension du flotteur en pierre. Chacune de ces cuvettes porte latéralement des tubulures à brides qui servent à établir leurs communications ; la première reçoit l'eau fournie par la pompe alimentaire, et la dernière verse le trop plein par un tuyau *i*, dans une colonne surmontée d'un entonnoir.

Les colonnes alimentaires renferment des flotteurs en fonte, suspendus par des chaînes qui passent sur deux poulies de renvoi, et dont les extrémités sont attachées aux registres *k*, *k*, *k*, *k*.

A ces mêmes colonnes, et à peu près à la moitié de leur hauteur, sont fixés des robinets à trois eaux *s*, *s*, *s*, *s*, qui communiquent entre eux par les tuyaux *t*, *t*, *t*, *t*. Ces robinets et ces tuyaux servent à faire retourner dans les chaudières l'eau de condensation de certains appareils de chauffage.

Les orifices de sortie de la vapeur sont garnis de soupapes logées dans des caisses en fonte qui communiquent entre elles par des tuyaux de même métal *l*, *l*, *l*, par lesquels s'écoule toute la vapeur fournie par les chaudières ; au moyen de cette disposition, les chaudières qui fonctionnent étant en communication, la vapeur y prend sensiblement la même tension.

Sur la conduite dont nous venons de parler, se trouvent deux boîtes *m* en fonte renfermant des soupapes de sûreté et de dégagement de la vapeur au dehors.

Les grilles des foyers sont formées chacune de deux rangées de barreaux, dont on voit les détails figures 6, 7, 8, 9 et 10 (pl. 32). Les porte-barreaux sont représentés figures 11, 12, 13, 14, 15 et 16 de la même planche. Les figures 17, 18 et 19 représentent l'élévation et des coupes verticales et horizontales d'un des châssis de fonte qui forme la face antérieure du fourneau. Les figures 20, 21 et 22 représentent les détails d'une porte de foyer.

944. *Petites chaudières.* On donne ordinairement aux petites chaudières la disposition indiquée par la figure 1re (pl. 33). La surface de chauffe est de 1m,50. Elle peut fournir 25 à 30 kilogrammes de vapeur à l'heure. Le foyer rayonne sur tout le fond de la chaudière, et la fumée qui sort par l'orifice A circule une seule fois autour de la chaudière, dans un canal qui a toute la hauteur de l'eau dans la chaudière; une petite murette oblige la fumée à suivre le carneau, qui communique à la cheminée par un canal placé derrière cette murette. Pour faciliter le nettoyage du canal circulaire qui règne autour de la chaudière, on le ferme par des briques D, D, qui s'enlèvent facilement quand celles qui sont indiquées par les lettres E et F ont été déplacées. L'espace annulaire vide GG, renferme de l'air stagnant.

Il est important, dans cette disposition, de ne pas donner une trop grande section aux carneaux; autrement l'air chaud n'en parcourrait que la partie supérieure, et on perdrait une grande partie de la surface de chauffe.

945. On a construit des fourneaux dans lesquels l'air chaud circulait un grand nombre de fois autour de la chaudière dans un canal ayant la forme d'une hélice; mais ces carneaux avaient nécessairement une grande largeur et produisaient une grande résistance. Ces fourneaux ne marchaient qu'avec un grand tirage, et sans produire plus d'effet que la disposition indiquée dans la figure 1re; d'ailleurs, il fallait nécessairement enlever la chaudière pour nettoyer les carneaux. Cette disposition est complétement abandonnée.

946. On a proposé ensuite de faire sortir l'air chaud du foyer par tous les points du contour de la chaudière, en plaçant entre la surface cylindrique de la chaudière et le mur enveloppant, des briques qui obligent la fumée à changer à chaque instant de direction. Ces chicanes augmentent la résistance de l'air, diminuent la surface de chauffe, nécessitent le déplacement de la chaudière pour le nettoyage des carneaux, et en outre une disposition particulière, analogue à celle de la figure 2 (pl. 34), pour la communication avec la cheminée, afin que l'air chaud ne suive pas seulement la surface de la chaudière la plus voisine de la cheminée. Toutes ces complications sont sans aucune utilité et doivent faire renoncer à cette disposition. On pourrait cependant l'employer en faisant monter l'air chaud librement tout autour de la chaudière sans

chicanes; mais il faudrait adopter, comme nous l'avons dit, une disposition convenable pour régulariser l'ascension de l'air chaud autour de la chaudière.

947. *Chaudières à basse pression.* Les figures 2 et 3 (pl. 33) représentent la disposition connue sous le nom de Watt. Ces chaudières ont le grand inconvénient de se déformer par la pression, malgré les nombreuses armatures qui s'opposent à l'écartement des flancs et des bouts, et les mouvements qui se produisent les font souvent perdre à froid. J'ai assisté à une expérience qui avait pour objet d'essayer la résistance d'une chaudière de Watt par de l'eau qu'on comprimait à l'aide d'une pompe foulante; elle éprouvait des déformations très-marquées, même sous de faibles pressions; je suis étonné que ces chaudières ne se détériorent pas plus promptement par les mouvements qu'elles éprouvent continuellement.

948. Les figures 4 et 5 présentent une modification assez importante des chaudières en tombeau. L'air chaud, après avoir parcouru la partie inférieure de la chaudière, revient en avant par un canal central, et retourne à la cheminée simultanément par deux carneaux latéraux. Par cette disposition, les surfaces de chauffe sont mieux utilisées, et le tuyau central sert d'armature pour maintenir les deux fonds. Mais il est difficile de répartir également l'air chaud dans les deux carneaux latéraux; presque toujours la vitesse est plus grande dans l'un que dans l'autre; et même si les carneaux sont trop grands, l'air chaud n'en parcourt qu'un seul. Il faut alors placer des registres à l'extrémité de chacun d'eux, et les régler de manière à diviser également la fumée entre eux; on y parviendra facilement en observant l'appel dans des petits orifices ménagés dans les plaques qui ferment les ouvertures des carneaux. On faciliterait beaucoup l'égale répartition de la fumée dans les deux carneaux latéraux, en plaçant dans le canal central une lame de tôle verticale de la hauteur du tube, de quelques décimètres de longueur, et qui se prolongerait en avant, de manière à séparer complétement le carneau en deux parties. On pourrait aussi faire passer la fumée tout entière par un seul carneau; mais on serait obligé, à la fin de la circulation, de la faire arriver à la cheminée par un canal qui ne renfermerait point de surfaces de chauffe.

949. La disposition indiquée dans les figures 6 et 7 (pl. 33) est bien préférable aux précédentes, parce que la chaudière ne peut pas se

déformer par la pression, et qu'elle n'exige par conséquent point d'armature; dans cette disposition, comme dans la précédente, la fumée revient en avant, dans un tube central, et retourne à la fois par les deux faces latérales de la chaudière. Tout ce que nous avons dit précédemment sur la difficulté de répartir également la fumée dans ces deux canaux, et sur les moyens d'y parvenir, est évidemment applicable à cette disposition.

950. Dans la figure 8, l'appareil est composé de deux chaudières, semblables à celle de la figure précédente, qui communiquent entre elles par la partie supérieure et par la partie inférieure; l'air chaud à l'extrémité du carneau A, se divise en deux parties, qui reviennent en avant par les tuyaux B,B, et retournent à la cheminée par les carneaux C,C. Cette disposition fait produire un plus grand effet utile aux surfaces de chauffe qui sont au-dessus du foyer, et permet d'employer des tôles moins épaisses.

951. La figure 9 représente la disposition des chaudières généralement employées en Cornwall, pour les machines d'épuisement à haute pression et à simple effet. Le foyer est intérieur; l'air brûlé revient en avant par un canal qui règne sous la chaudière et retourne à la cheminée par deux carneaux latéraux. Les chaudières sont ordinairement réunies au nombre de trois; mais deux seulement suffisent à la machine. Elles ont 7 pieds anglais de diamètre et 36 pieds de longueur; l'épaisseur de la tôle est de $\frac{7}{16}$ de pouce; le diamètre du tube intérieur est de 4 pieds, la longueur de la grille est la même; le mur au delà de la grille s'élève jusqu'à 9 pouces de l'arête supérieure; la distance des tubes à la partie inférieure est de 8 pouces; et le conduit inférieur a 4 pieds de largeur sur 20 pouces de hauteur. Ces dispositions sont très-bonnes; mais l'étranglement qui se trouve au delà de la grille concentre trop la chaleur dans le foyer, et altère rapidement la partie de la chaudière intérieure qui reçoit le rayonnement; en outre, le canal qui est au delà du foyer est trop grand, et sa surface de chauffe est mal employée: il faudrait y placer un bouilleur concentrique, comme l'indique la figure; enfin, il faudrait isoler du sol le conduit inférieur, par de l'air stagnant, au moyen d'une voûte. Avec ces changements, en donnant aux carneaux une section convenable, et à la surface totale de chauffe une étendue suffisante, cette

disposition serait certainement une des meilleures qu'on pût employer pour des chaudières à basse et à moyenne pression; elle serait surtout bien préférable aux chaudières en tombeau.

952. La figure 10 représente une chaudière analogue à la précédente, mais à deux tubes intérieurs et à deux grilles. En Cornwall, les tubes ont 29 pouces anglais de diamètre, et leur distance est de 10 pouces. Dans ces chaudières, comme dans les précédentes, l'étranglement qui se trouve au delà des grilles a le même inconvénient, et les grilles sont trop petites; mais la partie inférieure et intérieure de la chaudière est plus facile à nettoyer.

953. Les figures 11 et 12 présentent une disposition qui n'a pas été exécutée, mais dans laquelle la surface de chauffe serait certainement mieux employée que dans les chaudières ordinaires; l'air chaud, en sortant du foyer, parcourt une seule fois la longueur de la chaudière, mais dans un canal étroit qui embrasse toute la surface de chauffe, et dont la section est seulement suffisanté.

954. Les figures 13 et 14 présentent un système analogue, mais avec deux chaudières superposées.

955. Les figures 1, 2 et 3 (pl. 34) représentent une disposition qui n'a encore été employée que pour chauffer de l'eau dans un établissement de bains, mais qui serait également applicable pour produire de la vapeur. La chaudière est formée d'une partie horizontale et d'une partie verticale, et l'air chaud, dans son mouvement, enveloppe à la fois toute la chaudière; au sommet, l'air chaud est appelé par des orifices nombreux, de diamètres variables, dans un canal annulaire qui se rend à la cheminée; les orifices sont d'autant plus grands, que l'air qui les traverse a un plus grand chemin à parcourir, afin que l'appel s'effectue aussi uniformément que possible. A la partie supérieure de la chaudière se trouve un appareil pour purger la vapeur de l'eau qu'elle a pu entraîner. Dans ce système, le tirage a lieu pendant la chauffe, et, avec une hauteur de 3 ou 4 mètres, l'air chaud pourrait s'échapper à une température peu supérieure à 100°. Nous reviendrons sur cette disposition employée par MM. Thomas et Laurens, lorsqu'il sera question du chauffage de l'eau.

956. Les figures 4 à 8 (pl. 34) appartiennent à une chaudière à vapeur analogue à celle que nous venons de décrire, et qui a été construite par

Lemare. Elle est à foyer intérieur ; la figure 6 est une coupe suivant *ab* (fig. 5); la figure 7, une coupe suivant *cd* (fig. 5); et la figure 8 une coupe suivant *ef* (fig. 4). Une commission, nommée par la Société d'encouragement, a fait sur cette chaudière, qui produisait de la vapeur sous une pression de deux atmosphères, des expériences qui ont constaté que chaque kilogramme de charbon vaporisait $9^k,32$ d'eau. Dans une de ces expériences qui a duré $7^h,15'$, on a brûlé $76^k,876$ de houille, et on a vaporisé 717 kilogrammes d'eau. La quantité de houille brûlée par heure a été de $76,876 : 7,25 = 10,60$ ; et comme la surface de chauffe est à peu près de 5 mètres carrés, on voit que dans cet appareil chaque mètre carré de surface de chauffe correspondait à 2 kilogrammes de houille brûlés par heure, et que chaque mètre carré a produit à peu près 20 kilog. de vapeur. La surface de chauffe de cette chaudière est cependant à peu près double de celle des chaudières ordinaires, car pour déterminer la surface de chauffe, on suppose ordinairement que chaque kilogramme de charbon ne produise que 5 de vapeur ; alors pour brûler $10^k,6$ de houille par heure, ce qui correspondrait dans cette hypothèse à 53 kilogr. de vapeur, on aurait pris seulement $2^m,50$ de surface de chauffe. Mais ce n'est pas de cet accroissement seul de l'étendue de la surface de chauffe que résulte l'effet utile produit; il provient principalement de ce que les carneaux étant très-étroits, laminent la fumée et la refroidissent rapidement. La chaudière étant à foyer intérieur, la perte de chaleur par les parois est aussi très-faible, car elle correspond, comme nous le verrons plus tard, à $1^k,80$ de vapeur par mètre carré et par heure, or, la surface extérieure libre étant à peu près de 6 mètres carrés, la perte de chaleur par heure équivaut à $6 \times 1,8 = 10^k,8$ de vapeur, ou à 1 kilogramme de houille; ce qui est à peu près 0,1 seulement du combustible consommé. J'ai insisté sur cet appareil, non parce qu'il ne laisse rien à désirer, mais parce qu'il confirme ce que nous avons dit sur l'effet des carneaux étroits.

Dans cet appareil la grille avait 1 mètre carré de surface; et comme on a brûlé $10^k,6$ de houille par heure, la grille était de 5 à 10 fois plus grande que celles qui sont généralement employées. Cette circonstance n'a probablement pas été sans influence sur les résultats obtenus.

957. Les figures 1, 2, 3 et 4 (pl. 36) représentent une disposition de chaudière anglaise à basse pression. La figure 1 est une coupe verticale

dans le sens de la longueur de la chaudière; la figure 2 une coupe suivant la ligne brisée *abcd* (fig. 1); la figure 3 une coupe suivant *bc* (fig. 1); et la figure 4 une coupe suivant *gf* (fig. 2). Dans cette chaudière, qui a été décrite par Tredgold, l'air brûlé en sortant du foyer passe dans un tube intérieur, revient en avant par un canal latéral formé par la moitié du fond de la chaudière, et retourne vers le point opposé au foyer par un canal semblable. Cette forme de chaudière est compliquée, et ne semble présenter aucun avantage sur les chaudières généralement employées.

958. En Angleterre on emploie beaucoup de chaudières à foyer intérieur, disposées à peu près comme celles des bateaux à vapeur. La planche 35 représente une de ces chaudières. La figure 1 est une élévation de la face où se trouve la porte du foyer; la figure 2 une coupe transversale; la figure 3 une coupe longitudinale; et la figure 4 une coupe horizontale sur une plus petite échelle, pour indiquer le mode de circulation de l'air brûlé. L'appareil se compose de plusieurs chaudières placées les unes à côté des autres, et séparées par de petites murettes en briques. Elles sont supportées par des murs percés d'ouvertures terminées en dessus par des voûtes, de manière qu'on puisse facilement parcourir l'espace qui se trouve au-dessous. Lorsque ces chaudières ont une surface de chauffe suffisante, elles utilisent très-bien le combustible, mais elles sont d'une construction compliquée, surtout à cause des nombreuses armatures destinées à s'opposer à leur déformation.

959. *Chaudières à haute pression.* La disposition la plus générale des chaudières à haute pression est celle de la figure 9 (pl. 34). La partie inférieure seule des bouilleurs reçoit le rayonnement du foyer; leur partie supérieure, ainsi que la partie inférieure de la chaudière, est chauffée par l'air brûlé qui parcourt deux fois la longueur de la chaudière avant de se rendre dans la cheminée. La disposition représentée par les figures 10, 11 et 12, est bien préférable, parce qu'on utilise toute la surface de chauffe des bouilleurs.

960. Les figures 1, 2 et 3 (pl. 42) représentent différentes coupes d'une chaudière à haute pression chauffée au bois, construite par MM. Thomas et Laurens. Cette chaudière fonctionne depuis longtemps en donnant de très-bons résultats; elle alimente une machine de 20 à 25 chevaux.

961. MM. Halette et Walter Turner ont pris en 1835 un brevet, expiré en 1838, pour une nouvelle disposition de chaudières à vapeur. Pour en comprendre le principe, imaginons un carneau rectangulaire, enveloppé d'eau de tous les côtés, et supposons que de la face supérieure descendent deux lames métalliques, parallèles entre elles et aux faces latérales des carneaux; que l'intervalle qui les sépare soit fermé inférieurement et par les deux bouts, et ouvert à sa partie supérieure; l'espace compris entre les faces métalliques se remplira d'eau, et celles-ci serviront de surfaces de chauffe. Supposons plusieurs lames parallèles, semblables, également distantes, et d'autres semblables partant de la face qui forme le fond du carneau, mais communiquant par les bouts et par la partie inférieure avec la chaudière; il est évident que la fumée, en se dégageant entre ces plaques, sera divisée en lames très-minces, et, par conséquent, se trouvera dans une circonstance très-favorable à son refroidissement rapide. Mais cette disposition est très-compliquée et d'une exécution difficile; en outre, les dépôts qui s'accumuleraient dans les parties qui communiquent avec la partie supérieure des carneaux, seraient difficiles à enlever.

962. On a publié, dans le 36e volume des brevets d'invention, un brevet de M. Crépin, de Lyon, relatif à une nouvelle disposition de chaudières à vapeur qui a pour objet d'en augmenter la résistance. Les chaudières sont cylindriques, mais les feuilles de tôle sont assemblées d'une manière particulière; les anneaux sont rentrés et réunis intérieurement par une clouure serrée autour d'un anneau de fer. Cette disposition est compliquée; elle n'aurait pas, à beaucoup près, l'efficacité que lui suppose l'auteur, à cause de l'altération qu'éprouverait la tôle repliée sur elle-même à angle droit. D'ailleurs, en augmentant ainsi la résistance à la rupture suivant une arête, on ne fait éprouver aucune variation à la résistance suivant un anneau, et la rupture pourrait avoir lieu dans ce dernier sens si on ne garnissait pas la chaudière d'une armature qui s'opposât à la séparation des fonds.

963. M. Frimot a imaginé plusieurs dispositions nouvelles de chaudières (Brevets d'invention, tome 36), que nous essayerons de décrire succinctement. Dans une première disposition, la chaudière se composait d'un cylindre vertical, traversé par un cylindre concentrique, dont la moitié inférieure était évasée en cône : c'est au bas du cône que se trouvait le

foyer ; l'intervalle du cône et du cylindre n'était rempli d'eau que jusqu'au tiers à peu près de la hauteur ; au delà, le tuyau à fumée était environné de rebords coniques, évasés par le haut, qui formaient des entonnoirs annulaires d'un diamètre croissant de haut en bas ; c'est dans le premier entonnoir qu'arrivait l'eau d'alimentation, qui se déversait ensuite dans les entonnoirs suivants. Le foyer était alimenté par une trémie, et l'air était fourni par un ventilateur. M. Frimot a été dirigé par cette idée inexacte, qu'il faut rendre aussi mince que possible la colonne d'eau à échauffer, pour épargner le combustible. Je ne sais pas si cette chaudière a été exécutée, mais il est bien certain qu'elle n'aurait pu donner qu'un très-faible produit. Le ventilateur était d'ailleurs complétement inutile.

M. Frimot a aussi imaginé une autre disposition, encore plus compliquée que la précédente. La chaudière est verticale, allongée ; la partie inférieure est dans le foyer, et elle est chauffée dans toute sa hauteur, y compris la partie supérieure qui forme le réservoir de vapeur, par l'air brûlé qui l'environne de toute part. La partie qui doit être occupée par l'eau est divisée par des diaphragmes horizontaux un peu convexes vers le haut, et soudés contre les bords du tuyau. Les parties supérieures de deux compartiments consécutifs communiquent au moyen d'un tube ; enfin le tuyau d'alimentation arrive au compartiment inférieur, l'eau et la vapeur s'élèvent de case en case. Cette disposition n'a que l'avantage d'amener les dépôts dans la case la plus élevée. Elle est réellement impraticable par sa complication, et elle présenterait d'ailleurs des dangers d'explosion si l'un des tubes venait à s'obstruer. M. Frimot a ensuite exécuté une chaudière de même forme, mais dans laquelle les cloisons ne s'étendaient qu'à une petite distance des bords de la chaudière et étaient soudées à un tube central, ouvert au-dessous de chaque cloison et destiné à évacuer la vapeur, tandis que l'eau d'alimentation était obligée de suivre la surface de la chaudière. Les effets de cet appareil n'ont pas été constatés ; mais quand même ils auraient atteint le but que l'auteur s'était proposé, il est peu probable que l'effet utile eût été supérieur à celui des chaudières ordinaires, à cause de la faible étendue des surfaces de chauffe et de la dépense de travail de la machine soufflante.

964. Depuis, M. Beslay a construit des chaudières à tubes qui sont disposées d'une manière particulière. La chaudière de M. Beslay, destinée

à produire de la vapeur à 5 atmosphères, est composée de deux bouilleurs verticaux de 3 mètres de longueur, communiquant avec une chaudière horizontale placée au-dessus. Le foyer est à coke, et, au-dessous des bouilleurs; l'air chaud s'élève immédiatement dans une cheminée verticale qui environne les bouilleurs, mais qui est divisée en deux parties par une cloison qui sépare ces tubes. L'air brûlé circule ensuite une seule fois sous la chaudière, et s'échappe par un très-court tuyau de tôle. De la grille au sommet de cette courte cheminée la distance est de 5 mètres. La partie inférieure des bouilleurs est fermée par une pièce de cuivre, composée d'un anneau et d'une calotte réunis par une soudure forte; l'anneau est garni d'un croisillon intérieur, fixé à une tige de fer verticale qui passe à travers une tubulure de la chaudière, où elle est fixée par un écrou. Par cette disposition, le joint du bouilleur, avec la pièce de cuivre qui le termine, est d'autant plus étanche que la température est plus élevée, attendu que les bouilleurs se dilatent plus que la tige de fer. Chaque bouilleur renferme un tube d'un petit diamètre, qui s'ouvre dans la chaudière et se termine près de l'extrémité inférieure; ces tubes ont pour objet d'amener l'eau froide à la partie inférieure des bouilleurs; enfin, à la partie supérieure, les bouilleurs se terminent par un prolongement qui s'élève dans la chaudière jusqu'à une petite distance du niveau de l'eau. La chaudière est garnie d'une soupape à sifflet qui est mise en mouvement par un flotteur. D'après les expériences faites par une commission de l'Académie des sciences, le tirage de ce fourneau est très-bon; 1 kilogramme de coke produit 7 kilogrammes de vapeur; et quand par l'interruption de l'alimentation, la chaudière et les bouilleurs se sont vidés, la soudure de l'anneau de cuivre et de la calotte fond, et la projection de la calotte sur le foyer a lieu sans produire d'autre phénomène qu'un faible bruit.

965. En 1831, M. Hoyau avait pris un brevet pour une chaudière à vapeur bien disposée pour utiliser les surfaces de chauffe, mais d'une construction compliquée, et qu'il était difficile de nettoyer. Cette chaudière était formée de deux enveloppes : l'une, extérieure, avait la forme d'un cylindre vertical, à base circulaire, d'une hauteur deux ou trois fois plus grande que son diamètre; l'autre, intérieure, carrée et traversée par un grand nombre de tubes parallèles, horizontaux, très-rapprochés. Dans chaque rangée les tubes étaient placés en face des intervalles des

tubes des rangées précédentes et suivantes. Le foyer se trouvait au-dessous de l'enveloppe intérieure ; la fumée s'élevait par les intervalles des tubes, et s'échappait verticalement ; les intervalles des enveloppes intérieures et extérieures étaient fermés en dessus et en dessous. Convenablement modifiée, cette disposition pourrait être employée avec avantage pour les grandes chaudières de bateaux. — Voyez le tome 31 des Brevets d'invention.

966. M. Séguier a proposé, il y a quelques années, une nouvelle chaudière à vapeur, sur laquelle nous donnerons quelques détails. Les conditions que M. Séguier a cherché à remplir sont les suivantes :

« 1° Rendre l'explosion insignifiante, en fractionnant suffisamment, dans un nombre assez considérable de vases, soit la vapeur déjà formée, soit l'eau destinée à la produire, et réduisant ainsi le désastre aux proportions exiguës du premier des vases qui se rompt.

« 2° Combiner l'assemblage des différentes capacités, de façon à ce qu'elles soient toutes solidaires pour la production, pour l'alimentation, et cependant qu'elles restent indépendantes pour la construction et la réparation.

« 3° Disposer le système des vases ou capacités contenant le liquide, de façon à ce que celui-ci ne puisse point y subir l'influence des changements de position, quand la chaudière est sur un navire.

« 4° Ménager dans l'appareil la possibilité d'assigner des températures diverses aux différentes parties, de façon à ce que le feu soit fait sous la partie la plus chaude, ce qui permet aux gaz combustibles de s'enflammer, et de telle sorte, que la fumée s'échappe en définitive après avoir caressé la partie la plus froide, et avoir ainsi réuni le concours des circonstances les plus favorables pour faire passer, dans le temps le plus court, le calorique du corps chauffant dans le corps chauffé.

« 5° Disposer les surfaces des producteurs de manière que jamais, dans le cas d'une reprise d'alimentation, après un abaissement de niveau trop considérable et d'une incandescence des parois, le liquide réintroduit par la pompe alimentaire ne puisse brusquement se répartir sur une étendue de surface suffisante pour produire instantanément une quantité de vapeur dangereuse.

« 6° Obtenir enfin les avantages précités avec un appareil léger, peu compliqué, d'une construction simple, facile et même économique. »

La chaudière de M. Séguier, pour une machine de 20 chevaux, se

compose de 16 bouilleurs de $0^m,16$ de diamètre sur 4 mètres de longueur. 7 tubes accolés forment un plancher, situé au-dessus du foyer; des tubes accolés 3 à 3 dans des plans verticaux forment 3 cloisons, placées une de chaque côté du plancher, et l'autre au milieu. Les tubes, tous parallèles entre eux, ont une inclinaison totale de $0^m,66$. 2 foyers se trouvent sous les parties les plus élevées des bouilleurs. Tous les bouilleurs communiquent entre eux et avec une chaudière placée au-dessus, qui ne sert que de réservoir d'eau et de vapeur. L'ensemble de l'appareil est renfermé dans une enveloppe de tôle. Enfin, le tirage est produit par un ventilateur à force centrifuge.

Cet appareil paraît satisfaire aux conditions que M. Séguier s'est proposées. Il a, en outre, l'avantage d'accumuler les dépôts dans la partie des tubes qui est la moins échauffée. M. Séguier a fait éclater un des bouilleurs, l'explosion a été faible, et tout s'est borné à un jet d'eau chaude; mais les jets d'eau chaude sont malheureusement ce qu'il y a de plus à redouter dans les explosions, car il y a eu plus de personnes tuées par ces jets que par la projection des parties des chaudières et des corps environnants. Il serait bien à désirer que des expériences prolongées fussent faites sur un appareil de M. Séguier, et que les prévisions de l'auteur fussent confirmées par une longue expérience. On peut craindre que, dans cet appareil, le grand nombre de joints ne donnent lieu à des fuites fréquentes, que cette chaudière n'exige plus de soin pour l'entretien et plus de temps pour le curage, que la partie supérieure des tubes, celle qui est au-dessus des foyers, ne reste constamment pleine de vapeur, et que par suite ces tubes ne soient promptement brûlés.

967. On a proposé de placer au fond des chaudières des tubes fermés à la partie inférieure, qui descendent jusque dans le foyer et qui renferment des tubes concentriques ouverts par les deux bouts, dont l'extrémité supérieure s'élève un peu au-dessous du niveau de l'eau dans la chaudière, et dont la partie inférieure descende très-près du fond du tube enveloppant. Par cette disposition, la vapeur s'élèverait dans l'intervalle des deux tubes, et il s'établirait une circulation rapide de l'eau dans le tube intérieur et autour de lui; circonstance qui serait favorable à la formation de la vapeur; mais cette disposition est trop compliquée, et ne présenterait en définitive que peu d'avantages.

968. Dans toutes les chaudières dont nous avons parlé, l'air brûlé circule dans des carneaux horizontaux ou verticaux; et dans ce dernier cas le mouvement est dirigé de bas en haut. Mais, si dans certaines circonstances, les chaudières devaient être placées verticalement, on utiliserait beaucoup mieux les surfaces de chauffe en faisant mouvoir l'air brûlé de haut en bas, attendu que, quand l'air brûlé s'élève, il peut ne s'étendre que dans une partie du canal, et que, quand il marche en sens contraire, il se répartit uniformément dans toute la section du canal. Cette différence provient de ce que, dans le premier cas, le tirage augmente dans la direction que prend l'air brûlé, et qu'il diminue dans le second. En outre, dans le premier cas, la vitesse des veines d'air qui touchent les surfaces de chauffe est plus petite que celle des veines qui sont au centre du canal, et le contraire a lieu quand l'air brûlé descend.

969. *Nouvelle chaudière à vapeur de M. Perkins.* M. Perkins a imaginé, il y a quelques années, un nouveau mode de chauffage de l'air par la circulation de l'eau dans un circuit complétement fermé, composé de tuyaux de fer d'un petit diamètre; une partie du circuit est fortement chauffée, et la circulation s'établit en vertu de la différence de densité des deux parties du circuit réunies au point le plus bas et au point le plus élevé. Cet ingénieur a employé le même moyen pour chauffer l'eau d'une chaudière à vapeur. Pour avoir une idée nette de l'appareil de M. Perkins, imaginons un tube de fer de $0^m,02$ de diamètre intérieur tourné en spirale dans un foyer; dans une chaudière hermétiquement fermée placée à côté, une spirale semblable, les parties supérieures et inférieures des deux spirales en communication par des tubes de même diamètre; et enfin, à la partie supérieure du circuit, un cylindre d'un plus grand diamètre, hermétiquement fermé, dans lequel s'effectue la dilatation de l'eau pendant le chauffage. Il est évident que l'eau circulera dans le circuit, qu'elle chauffera l'eau de la chaudière, et que si la température de l'eau en circulation est assez élevée, il se produira de la vapeur dans la chaudière. Les figures 4 et 5 (pl. 42) représentent une chaudière à vapeur ainsi disposée. L'appareil se compose de dix-sept circuits égaux, placés à côté les uns des autres *abcdefghiklm*, qui communiquent avec le même tube d'expansion M. Les parties *lh* des tubes servent de grille, et l'air brûlé traverse plusieurs fois en descendant les faisceaux de tubes.

L'eau, fortement chauffée, parcourt dans la direction *abc* les parties des tubes placées dans la chaudière. En parlant des calorifères à eau chaude à haute température, nous donnerons les détails nécessaires sur l'ajustement des tubes.

On a prétendu que, par cette disposition, on obtenait plus de vapeur pour la même consommation de combustible qu'avec les chaudières ordinaires; mais il ne peut pas en être ainsi, car, dans les appareils où la combustion s'effectue dans les mêmes circonstances, l'effet utile dépend uniquement de la température à laquelle l'air brûlé est abandonné, et il semble que cette température doive être plus élevée dans l'appareil de M. Perkins que dans les autres; du moins elle ne pourrait pas s'abaisser autant, attendu que l'eau de circulation doit prendre une température beaucoup plus élevée que la vapeur. On serait tenté de ne voir dans cet appareil qu'une plus grande complication et deux systèmes de surfaces de chauffe au lieu d'un seul. A la vérité, on a dit que, par la grande vitesse de circulation de l'eau, la transmission de la chaleur était beaucoup plus grande que dans le chauffage ordinaire, mais des expériences directes n'ont pas encore confirmé cette assertion.

Ce mode de chauffage aurait cependant l'avantage de prévenir les explosions qui résultent de l'altération des chaudières par l'action directe du feu, et celles qui proviennent de l'excès de température que prend la chaudière par suite de l'abaissement du niveau de l'eau; il ne resterait alors que les chances d'explosion résultant d'un excès de pression dans la chaudière, car les tubes, qui ont toujours une grande épaisseur, offrent une énorme résistance, et d'ailleurs la rupture d'un ou de plusieurs tubes ne produirait pas de graves accidents, à cause de la petite quantité d'eau qu'ils renferment.

970. Pour les générateurs fixes, à haute ou à basse pression, les chaudières cylindriques à bouilleurs ont encore moins d'inconvénients que toutes les autres dispositions qui ont été proposées, et doivent être préférées, dans presque tous les cas, à tous les autres systèmes.

*Chaudières de bateaux.*

971. Les machines les plus généralement employées dans les bateaux à vapeur sont à basse pression et à condensation. La planche 37 renferme tous les détails d'un système de chaudière destiné à une machine de ce genre.

La figure 1re est une élévation de la face des chaudières où se trouvent les portes des foyers; la figure 2 est une projection horizontale de l'une des chaudières, et une coupe horizontale de l'autre; la figure 3 est une coupe verticale par le milieu d'un des foyers; la figure 4 une coupe horizontale par la ligne $xx'$ (fig. 3). L'appareil renferme deux chaudières accolées, qui n'ont rien de commun que la cheminée; elles sont destinées à une machine de 50 chevaux.

A,A′, portes des foyers. B,B′, cendriers. C,C′, grilles. D,D, D′,D′, carneaux de circulation de l'air brûlé. E, cheminée commune. $a,a$, $a',a'$, robinets. $b,b'$, aiguilles des appareils de niveau, dont les détails sont représentés sur une plus grande échelle (fig. 5). $c,c'$, tiges qui servent à faire tourner les leviers $c'',c'''$ (fig. 4) qui soulèvent les poids des soupapes de sûreté $d$; un de ces leviers est représenté sur une plus grande échelle (fig. 6). $e,e'$, robinets des tubes d'alimentation; la figure 7 représente une coupe d'un de ces robinets. $f,f'$, orifices qui ne s'ouvrent que quand on nettoie les chaudières. $g,g'$, tubes destinés à faire écouler l'eau chaude de la chaudière quand on emploie de l'eau de mer et qu'elle a atteint le point de saturation. $h$, tuyau d'écoulement de la vapeur. $i,i'$, soupapes à air, représentées sur une plus grande échelle (fig. 8). $k,k'$, robinets à clapets qui servent à régler l'émission de la vapeur. $l,l'$, soupapes de sûreté. $m$, tuyau d'écoulement de la vapeur qui se dégage des soupapes de sûreté.

Les chaudières des bâtiments à vapeur anglais sont presque toutes disposées comme celle que nous venons de décrire.

972. Le tableau suivant renferme, d'après M. Grouvelle, les principales dimensions des générateurs des stéamers *le Rollon*, *le Madagascar* et *la Héva*, construits, le premier par Maudslay, et les deux derniers par M. Cavé.

| RENSEIGNEMENTS SUR LES CHAUDIÈRES. | LE ROLLON. | LE MADAGASCAR. | LA HÉVA. |
|---|---|---|---|
| Puissance en chevaux | 120 | 120 | 100 |
| Nombre de foyers | 4 | 6 | 2 |
| Surface totale des grilles en mètres carrés | 6,4 | 8,16 | 8 |
| Surface de chauffe.....id..... | 100 | 110 | 83 |
| Section des carneaux.....id..... | 1,05 | 1,26 | 0,80 |
| Section de la cheminée.....id..... | $0^{m},88$ | 0,95 | 0,60 |
| Consommation de houille par heure à raison de 5,25 par cheval | 630 | 630 | 450 |
| Houille brûlée par décimètre carré de grille | 1 | 0,76 | 0,56 |
| Houille par mètre carré de surface de chauffe | $6^{k},30$ | 5,25 | 4,50 |
| Houille brûlée par décimètre carré de cheminée | 7,20 | 6,6 | 6 |

973. Les surfaces de chauffe de ces trois générateurs sont beaucoup trop petites, car chaque mètre carré devrait correspondre au plus à une consommation de 4 kilogrammes de houille à l'heure. Les sections des cheminées sont aussi trop petites, du moins pour la première, dont la grille est la plus petite de toutes. C'est sans aucun doute à la trop petite section des cheminées de bateaux qu'il faut attribuer cette énorme quantité de fumée qui s'échappe à leur extrémité, et le faible produit du combustible; car ces cheminées ne peuvent suffire à la consommation du foyer, qu'autant que le volume d'air appelé est beaucoup plus petit que celui qui serait nécessaire pour effectuer une combustion complète.

En supposant 10 mètres de hauteur à la cheminée du *Rollon*, la longueur totale des carneaux serait de 20 mètres. Et en admettant 300° pour la température de la fumée dans la cheminée, la méthode indiquée (406), donne pour la section de la cheminée $1^{m},25$; ce qui correspond à peu près à 5 kilogrammes de houille brûlés par heure et par décimètre carré de section. Les cheminées des autres chaudières sont suffisantes, parce que les grilles sont plus grandes et offrent moins de résistance.

974. La marine militaire emploie uniquement des chaudières de cuivre. On prétend qu'elles durent 12 ans, et celles en fer seulement 4; mais il y a des bâtiments de commerce dont les chaudières en fer durent beaucoup plus longtemps.

975. Les figures 1, 2, 3, 4 et 5 (pl. 38) représentent une autre disposition de générateur à foyer intérieur pour une machine de 30 chevaux. La figure 1re est une coupe suivant la ligne brisée ABCD du plan figure 5. La figure 2 une coupe verticale suivant la ligne EF du plan figure 5. La figure 3 une élévation du générateur par le bout. La figure 4 une coupe horizontale suivant la ligne GH de la coupe figure 2; et enfin la figure 5 le plan, en supposant qu'on ait enlevé la moitié de l'enveloppe supérieure.

A, foyers. *a*, portes des foyers. *b*, grilles. *c*, cendriers. *d*, tasseaux sur lesquels reposent les grilles. *e*, entourage en fonte des foyers. *f*, carneaux. *g*, lames d'eau horizontales, en communication par les lames d'eau *g'*, avec le cylindre *l*. *r*, fond de la chaudière recevant les dépôts de l'eau. *i*, tampon et robinet pour vider et nettoyer la chaudière. *k*, supports en fonte sur lesquels repose la chaudière. *k'*, façade en fonte attenante au support *k*, et sur laquelle sont ajustées les portes des foyers. *l*, cylindre d'eau au centre de la chaudière. *o*, cornières en fer. *p*, cheminée. *q*, tampons pour nettoyer la cheminée. *r*, tampons pour nettoyer les carneaux. *x*, enveloppe extérieure de la chaudière.

D'après M. Ducel, ces chaudières pèsent deux fois moins, et contiennent deux fois moins d'eau que celles qui sont généralement employées. A la partie supérieure la tôle a de 2 $\frac{1}{2}$ à 3 lignes d'épaisseur. Les surfaces de chauffe ont été calculées en supposant que chaque mètre carré de surface horizontale produise de 15 à 20 kilogrammes de vapeur, et les surfaces verticales deux fois moins. Le poids moyen de chaque mètre carré de surface est de 48 kilogrammes.

Suivant M. Ducel, chaque kilogramme de houille vaporise dans ses chaudières 8k,20 d'eau, et 9 kilog. quand l'eau d'alimentation est à 40°.

Les assertions de M. Ducel, relatives à l'effet utile de ses chaudières, ne paraissent pas fondées : du moins des expériences faites à Paris n'ont donné que les résultats ordinaires; cependant, comme ces chaudières renferment beaucoup plus de surface de chauffe que les chaudières ordinaires, je pense que, dans un travail continu, elles doivent donner des

résultats plus avantageux. Elles sont évidemment beaucoup plus faciles à nettoyer que celles qui sont généralement employées.

976. Les figures 6, 7 et 8 (pl. 38) représentent une disposition analogue du même constructeur. La figure 6 est une coupe verticale par le milieu du foyer; la figure 7 une coupe longitudinale par la ligne CD (fig. 8); et la figure 8 une coupe horizontale par la ligne AB (fig. 7).

977. Les générateurs à haute pression des bateaux sont souvent composés de chaudières cylindriques à bouilleurs, disposées comme l'indique la figure 1re (pl. 39). Les bouilleurs sont accolés; les foyers sont placés au-dessous sans aucune séparation; l'air chaud les chauffe en dessous, et revient en avant en chauffant leur partie supérieure et la partie inférieure des chaudières; de là il se rend dans la cheminée en passant devant les chaudières, et par plusieurs cheminées partielles destinées à rendre le tirage uniforme sous toutes les chaudières. Le système est renfermé dans une caisse en tôle garnie intérieurement de briques. Le sol du carneau, qui se trouve au delà du foyer, est formé de barres de fer recouvertes de briques.

978. Dans le bateau *la Picarde* à haute pression, à détente et sans condensation, construit par M. Dietz, le générateur est composé de trois chaudières cylindriques de $0^m,65$ de diamètre, et de 6 mètres de longueur, en contact, garnies chacune de deux bouilleurs disposés à la méthode ordinaire; tout le système est renfermé dans une cage en fer dont les flancs sont revêtus d'une muraille en briques. La flamme et la fumée chauffent tous les bouilleurs en dessous, et reviennent en avant en chauffant la partie supérieure des bouilleurs et la partie inférieure des chaudières; la fumée est alors dirigée dans une cheminée de tôle, dont la base s'étend sur toute la largeur du fourneau. Les bouilleurs communiquent entre eux sur le devant par des tuyaux en cuivre, et les chaudières par d'autres tuyaux également en cuivre placés à leur partie inférieure, et l'alimentation n'a lieu que par les bouilleurs extrêmes. Cette disposition est représentée dans les figures 5 et 6 (pl. 36). Ce système de générateurs est un peu plus lourd que ceux qui sont à foyers intérieurs; mais il est plus facile à nettoyer, et il présente plus de sécurité pour les hautes pressions. La machine consomme $4^k,7$ de houille par heure et par force de cheval.

979. M. Cochot a employé, pour les bateaux à vapeur, un cylindre

horizontal renfermant un grand nombre de tubes horizontaux en fer traversés simultanément par l'air brûlé, comme dans les chaudières des locomotives; mais les tubes sont d'un plus grand diamètre, et le mode de jonction des tubes avec les fonds de la chaudière est entièrement différent : les jonctions ont lieu par des boîtes à étoupe préservées de la chaleur par de l'eau (Bulletin de la Société d'encouragement, tome 37). Cette disposition est ingénieuse, mais compliquée; et il est peu probable que les joints restent étanches.

980. Les figures 2 et 3 (pl. 39) représentent une disposition de chaudières à foyer intérieur, qui, sous le rapport de la résistance et de l'effet produit par les surfaces de chauffe, offrirait un grand avantage. La chaudière est formée de deux tubes concentriques et d'un bouilleur placé dans la chaudière intérieure au delà du foyer. Deux cylindres, fixés à la partie supérieure, servent, l'un de magasin de vapeur, l'autre à dépouiller la vapeur de l'eau qu'elle entraîne avec elle.

981. Les figures 4 et 5 représentent une disposition qui, dans certaines circonstances, pourrait être avantageuse. Les chaudières sont cylindriques et placées verticalement; les foyers sont au centre, et l'air brûlé s'élève d'abord verticalement et descend ensuite, par plusieurs tubes verticaux qui traversent l'eau, pour gagner la cheminée commune à deux appareils. Les tubes d'écoulement de l'air brûlé étant prolongés jusqu'à la partie supérieure des chaudières, peuvent être facilement nettoyés; l'air brûlé se répartit également dans tous (968), et les surfaces de chauffe sont mieux utilisées que dans les autres modes de circulation; enfin, les appareils n'ont qu'une faible étendue horizontale; mais les grilles ont des dimensions très-limitées.

982. Les figures 6, 7 et 8 (pl. 39) représentent le plan et deux élévations de la chaudière du bateau à vapeur *le Chancellor Livingston*. Le foyer est construit dans le bout de la chaudière, afin qu'il soit entièrement environné d'eau; il est disposé de manière à pouvoir brûler de la houille; deux tuyaux horizontaux à travers lesquels passent la flamme et la fumée, se rendent au travers de l'eau jusqu'au bout de la chaudière, où ils se recourbent pour revenir parallèlement à eux-mêmes près du foyer. Là, ils sont réunis à la cheminée par un tuyau qui s'élève obliquement. La partie de la chaudière qui enveloppe le foyer est plus haute et plus large que le reste. On voit sous le cendrier deux ou-

vertures par lesquelles on retire l'eau et le sédiment de la chaudière. Les robinets qui servent à régler la hauteur de l'eau dans la chaudière sont placés à environ 15 centimètres au-dessus des tuyaux horizontaux ; c'est la hauteur d'eau qu'on maintient ordinairement au-dessus des parties les plus élevées.

983. La figure 9 indique une disposition analogue employée à bord du bateau *le Swift;* la flamme parcourt aussi deux tuyaux horizontaux, mais elle revient à la cheminée par un seul.

984. La figure 10 donne une idée de la chaudière du bateau à vapeur *le Robert-Fulton,* la plus grande qui ait été construite pour des bateaux à vapeur; elle a $9^{m},4$ de longueur, $3^{m},9$ de largeur, et $2^{m},7$ de hauteur; quatre tuyaux horizontaux, qui occupent presque toute la longueur de la chaudière, partent du foyer et reviennent au-dessus d'eux-mêmes vers le devant de la chaudière, où ils se réunissent à la cheminée.

985. Les figures 11, 12 et 13 appartiennent à la chaudière du bateau *le Connecticut;* elle est composée de trois cylindres : deux de $1^{m},8$ de diamètre et de $6^{m},6$ de longueur, placés sur le même plan, et un de $1^{m},5$ de diamètre et de 6 mètres de longueur, placé au-dessus des autres. Chacun des cylindres est traversé d'un bout à l'autre par un tuyau horizontal de $0^{m},9$ de diamètre; les foyers sont placés dans les tuyaux intérieurs des deux chaudières inférieures qui sont élargis sur le devant; la flamme et la fumée, après avoir parcouru ces deux tuyaux, se rendent dans celui du cylindre supérieur par des tuyaux inclinés, et s'échappent par la cheminée placée sur le devant.

Les trois cylindres communiquent par divers tuyaux, afin que l'eau et la vapeur puissent passer de l'un dans les autres; ces tuyaux ne sont point indiqués dans la figure. Le cylindre supérieur est destiné à recevoir l'eau fournie par la pompe alimentaire, et à la porter à une certaine température avant qu'elle soit introduite dans les tuyaux inférieurs où se forme la vapeur, et qui seuls communiquent avec la machine. La largeur des tuyaux à l'entrée, où ils forment le foyer, est de $1^{m},50$. L'eau s'élève à $0^{m},15$ au-dessus. La cheminée a $0^{m},9$ de diamètre, et 10 mètres de hauteur. La capacité de chaque cylindre est d'environ 8 tonneaux; il reste environ 4 tonneaux pour la vapeur.

986. Dans la chaudière figure 14, le foyer est environné par la chaudière, mais le courant d'air chaud s'étend sous le reste de la chaudière,

et revient vers le devant par deux tuyaux horizontaux qui communiquent avec la cheminée par deux tuyaux obliques. Cette chaudière appartenait à un bateau démoli; c'est, aux dimensions près, la disposition adoptée à bord de la batterie flottante *le Fulton premier*.

987. La chaudière (fig. 15) est formée de trois cylindres; le foyer est au-dessous comme dans les précédentes, et la fumée revient également par des tuyaux qui passent dans l'eau contenue dans les cylindres. La chaudière du bateau *le Delaware* est ainsi disposée.

988. Les figures 16 et 17 représentent une disposition également employée dans les bateaux américains.

989. Maintenant il y a une tendance générale en Amérique, à employer pour les bateaux à vapeur, des chaudières renfermant un grand nombre de petits tubes environnés d'eau et parcourus simultanément par l'air brûlé, mais dont les extrémités les plus voisines du foyer en sont à une assez grande distance pour ne recevoir qu'une faible partie de la chaleur rayonnante.

990. En parlant des foyers à anthracite (663), nous avons décrit une disposition de chaudière tubulaire (fig. 10 et 11, pl. 13), qui a la plus grande analogie avec les chaudières des locomotives, et qui présenterait de grands avantages si on pouvait éviter la prompte altération des tubes et des joints. Nous donnerons ici quelques nouveaux détails sur la chaudière construite par M. Manby. Les tubes sont en cuivre; leur diamètre est de 2 pouces $\frac{1}{4}$; leur épaisseur de $\frac{1}{16}$ de pouce. Chaque grille a $1^m,20$ de côté; les angles sont arrondis au moyen de quelques briques; sans cette précaution, l'anthracite arriverait difficilement jusqu'aux angles. Le tube qui alimente le foyer est en cuivre fondu; il a 9 pouces anglais de côté.

### *Chaudières des locomotives.*

991. Les chaudières des locomotives doivent avoir peu de volume, peu de poids, et une petite hauteur de cheminée. Il a fallu alors disposer les surfaces de chauffe de la manière la plus favorable pour le refroidissement rapide de l'air chaud, et on a dû employer un tirage artificiel pour effectuer la combustion. Les chaudières des locomotives sont toutes formées d'un foyer rectangulaire enveloppé d'eau de tous côtés, et d'un grand nombre de tubes de laiton d'un petit diamètre, que l'air chaud

parcourt simultanément pour se rendre dans la cheminée. C'est M. Seguin qui a employé le premier les chaudières tubulaires sur le chemin de Saint-Étienne à Lyon. Dans tous ces appareils, les machines étant à haute pression, sans détente ni condensation, le tirage s'effectue par l'injection de la vapeur dans la cheminée, après qu'elle a agi sur les pistons des machines.

992. Les planches 40 et 41 représentent tous les détails relatifs à la chaudière d'une locomotive de la force de 40 chevaux, de Stephenson.

La figure 1re (pl. 40) est une coupe longitudinale de l'appareil; la figure 2 l'élévation de la face où se trouve la porte du foyer; la figure 3 une coupe transversale; la figure 4 représente sur une plus grande échelle le mode d'ajustement des tubes parcourus par la fumée; la figure 5 la porte du foyer; les figures 6 et 7 le régulateur pour l'admission de la vapeur dans la machine. La figure 1re (pl. 41) est une élévation latérale de la chaudière; la figure 2 l'élévation de la face extérieure; la figure 3 la face de la chaudière qui reçoit les extrémités des tubes; la figure 4 représente la cheminée; les figures 5 et 6 le trou d'homme; la figure 7 les détails de construction de la plaque qui ferme la face de derrière de la chaudière.

Le foyer A est intérieur; on n'y brûle que du coke. L'air brûlé, en sortant du foyer, s'échappe par une série de tubes de cuivre B, B, environnés d'eau; ces tubes sont fixés d'une manière fort ingénieuse; ils entrent librement par leurs extrémités dans des ouvertures percées dans les fonds opposés des chaudières, et les joints sont rendus étanches par des cônes de fer creux dont le plus grand diamètre extérieur dépasse le diamètre de l'orifice (fig. 4, pl. 40), et qu'on introduit de force dans chaque tube. La vapeur, après avoir agi dans les machines placées dans la boîte à fumée, s'échappe par le tuyau C en produisant un très-grand tirage.

993. La puissance des locomotives varie ordinairement de 25 à 50 chevaux; et la consommation de coke par heure est de 250 à 500 kilog., ce qui correspond à 10 kilog. par force de cheval et par heure.

994. La surface des grilles varie de 0,60 à 1m,15. Alors la consommation de coke par décimètre carré de grille et par heure dépasse 4 kilog. et par conséquent quatre fois celle des grilles des machines fixes alimentées par la houille. Cet effet résulte de ce que le tirage produit

par l'injection de vapeur dans la cheminée excède beaucoup celui qui est produit par la chaleur dans les cheminées ordinaires.

Le nombre des tuyaux varie de 80 à 167; leur diamètre est ordinairement de 4 à 5 centimètres; leur longueur de $2^m,10$ à $2^m,70$.

995. Il résulte des expériences qui ont été faites, en séparant la vapeur produite par les faces du foyer de celle qui est produite par les tubes, qu'à surface égale les tubes produisent trois fois moins de vapeur que les plaques du foyer.

996. En réduisant les surfaces des tubes en une surface de chauffe directe équivalente, on trouve que la quantité moyenne de vapeur produite par mètre carré et par heure excède souvent 120 kilog., et que, dans certaines locomotives, elle s'élève à 160 kilog. Cet effet est de beaucoup supérieur à celui qui est produit dans les chaudières fixes. La différence provient et de la haute température du foyer et du mode de circulation de la fumée qui se dégage par un faisceau de tubes dont la section relative au contour est beaucoup plus petite que dans les chaudières fixes.

997. Les diamètres des cheminées ne varient qu'entre des limites très-restreintes, de $0^m,34$ à $0^m,37$. Les volumes d'air qui s'écoulent par seconde varient de $3^m,72$ à 8 mètres; et les vitesses d'écoulement de 45 mètres à 104. Le travail dépensé pour donner à l'air qui s'écoule ces grandes vitesses, est compris entre 176 et 1825 kilogrammètres; ce qui correspond à des forces de 2,34 à 24,33 chevaux. La vitesse d'écoulement qui résulterait de la chaleur seule ne dépasserait pas 2 à 3 mètres par seconde. Ce travail est produit par la vapeur à sa sortie du cylindre; mais la vapeur ne réalise, en agissant sur l'air, qu'une fraction du travail qu'elle pourrait produire. D'après MM. Flachat et Petiet, cette fraction varie de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{6}$, en ne tenant pas compte des frottements.

998. M. de Pambour, en plaçant dans les cheminées des locomotives des tuyères dont il pouvait à volonté augmenter ou diminuer l'ouverture, a reconnu : 1° que l'emploi de la tuyère quintuple la vaporisation naturelle de la chaudière; 2° qu'en adoptant l'orifice de la tuyère le plus avantageux, on peut augmenter la vaporisation; 3° qu'en employant dans les locomotives une tuyère variable, on pourrait reconnaître en quelques voyages l'orifice le plus convenable et le conserver.

999. D'après des expériences faites sur des chaudières d'une petite

dimension, on a admis, comme nous l'avons dit, que les quantités de chaleur fournies par la même étendue des surfaces qui environnent le foyer, et des tuyaux de dégagement de l'air brûlé, sont dans le rapport de 3 à 1.

M. de Pambour a cherché à vérifier cette loi en observant les quantités d'eau vaporisées dans des chaudières où ces deux espèces de surfaces de chauffe se trouvaient dans des rapports très-différents. Il est évident que si les surfaces du foyer ont un plus grand pouvoir de vaporisation que les surfaces des tuyaux, la vaporisation moyenne, par mètre carré, doit être d'autant plus grande que les chaudières ont une plus grande surface de chauffe relative autour du foyer. Les locomotives soumises à ces essais étaient de trois espèces. En représentant par l'unité la surface de chauffe du foyer, dans les premières la surface totale était 8, 7; dans les secondes, elle était 6, 5; et enfin, dans les dernières, la surface totale de chauffe n'était que 4, 5.

M. de Pambour déduit de ses expériences, qu'à surface égale l'enveloppe du foyer et les tubes produisent le même effet; et il explique cette égalité par la haute température de l'air brûlé, circonstance qui n'existe que pour de très-grands tirages. Cet ingénieur a constaté que dans les machines fixes on obtient à peu près les résultats indiqués d'abord. Ces dernières expériences ont été faites sur une chaudière de locomotive qui se trouvait divisée, par une cloison, en deux compartiments correspondants aux deux espèces de surfaces de chauffe.

Ainsi, sous le rapport de la transmission de la chaleur, le rapport de l'étendue des surfaces qui environnent les foyers à celle des tubes, serait arbitraire. Mais, d'après les expériences du même ingénieur, le meilleur effet utile s'obtiendrait quand la surface chauffée par rayonnement serait 0, 1 de la surface de chauffe totale.

1000. Le tableau des expériences de M. de Pambour (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences,* t. X) ne confirme ce que nous venons de dire, que dans la supposition que la quantité de vapeur consommée par une locomotive soit proportionnelle à la racine 4$^{e}$ de la vitesse, ce qui ne me paraît pas admissible; en la supposant, avec tous les ingénieurs qui se sont occupés de ces machines, proportionnelle à la vitesse, hypothèse qui doit s'éloigner bien peu de la réalité, et en rectifiant quelques fautes de calcul, on arrive aux résultats suivants :

| NUMÉRO de la série. | SURFACE DE CHAUFFE du foyer. | des tubes. | totale. | VITESSE de la machine en kilom. par heure. | VAPORISATION totale par heure. | par mètre carré de surface totale par heure. | RAPPORT de la surface totale à celle du foyer. | VAPORISATION par mètre carré pour une vitesse de 32 kilom. par heure. | OBSERV. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m | | | k | k | k | | | |
| I | 3,413 | 26,207 | 29,620 | 32,40 | 1804 | 60,90 | 8,68 | 60,15 | Moyenne de 7 exp. |
| II | 4,580 | 25,283 | 29,863 | 29,21 | 1797 | 60,18 | 6,52 | 65,92 | Moyenne de 9 exp. |
| III | 5,302 | 18,32 | 23,62 | 24,56 | 1391 | 58,88 | 4,46 | 76,71 | Moyenne de 2 exp. |
| IV | 5,302 | 18,32 | 23,62 | 14,47 | 1240 | 52,49 | 4,46 | 116,08 | Résultat d'une seule exp. |

1001. En désignant par $x$ la production de vapeur par heure et par mètre carré de surface de chauffe du foyer, et par $y$ la production de vapeur par heure et par mètre carré de surface des tubes, on aura pour les trois premières expériences et pour la même vitesse :

$$3{,}4\,x + 26{,}20\,y = 60{,}15 \times 29{,}62 = 1781{,}60$$
$$4{,}6\,x + 25{,}30\,y = 65{,}92 \times 29{,}86 = 1968{,}4$$
$$5{,}3\,x + 18{,}32\,y = 76{,}71 \times 23{,}62 = 1811{,}9.$$

Les deux premières équations donnent $y = 43{,}5$ et $x = 185$ ; ces deux nombres vérifient sensiblement la troisième, et sont entre eux dans le rapport de 1 à 4. Ainsi les expériences justifient ce fait admis depuis longtemps, que les surfaces du foyer, sous la même étendue, produisent au moins trois fois plus de vapeur que les tubes.

## § 13. — CHAUDIÈRES CHAUFFÉES PAR LA CHALEUR PERDUE DE L'AIR BRULÉ OU DES GAZ COMBUSTIBLES QU'IL RENFERME.

1002. Dans un grand nombre de cas, l'air brûlé est abandonné à une très-haute température ; dans d'autres, il renferme une grande quantité de gaz combustibles ; dans tous les cas, la chaleur qu'il possède, ou celle qu'on obtiendrait en brûlant complétement les gaz combustibles qui s'y trouvent, peut être employée à produire de la vapeur.

1003. Lorsque la combustion a été complète dans un foyer, et que l'air s'échappe à une haute température, comme, par exemple, dans les fourneaux où l'on fabrique le gaz de l'éclairage, on peut produire de la vapeur en plaçant une chaudière dans le canal qui conduit l'air brûlé

du fourneau à la cheminée. En général, le tirage n'éprouvera que peu de diminution, parce que la température de l'air brûlé sera rapprochée de celle qui correspond au maximum de tirage. Mais si l'on voulait refroidir la fumée autant qu'elle peut l'être par une chaudière à vapeur, les circuits autour de la chaudière auraient un grand développement, et il pourrait être nécessaire d'avoir recours à un tirage artificiel. Si on n'avait pas d'autre puissance mécanique que celle qui provient de la vapeur ainsi formée, il faudrait disposer l'appareil de manière à produire d'abord de la vapeur par un foyer additionnel, qu'on supprimerait quand la machine marcherait, en faisant alors circuler l'air brûlé autour de la chaudière. On pourrait aussi disposer l'appareil de manière que l'air brûlé pût parvenir à la cheminée sans parcourir toutes les surfaces de chauffe, et à une température assez élevée pour produire le tirage; alors, pour effectuer la mise en train, on ferait suivre ce chemin à l'air brûlé, après quoi on lui ferait parcourir toutes les surfaces de chauffe. Le mode de tirage le plus avantageux consisterait dans l'emploi d'un ventilateur à force centrifuge, qui appellerait l'air brûlé, refroidi après qu'il aurait passé autour de la chaudière, pour le rejeter dans la cheminée (fig. 6 et 7, pl. 42). On pourrait aussi, si la vapeur était produite à une haute pression, employer un jet de vapeur dans le cendrier ou dans la cheminée.

1004. Nous entrerons dans quelques détails sur la disposition des chaudières chauffées par la chaleur et les gaz combustibles perdus des fours à coke et des fourneaux métallurgiques.

1005. Les fours à coke dont nous avons déjà parlé (235), ressemblent à des fours de boulanger; mais ils sont garnis d'une courte cheminée par laquelle s'échappent les gaz qui se dégagent pendant la transformation de la houille en coke. Ces gaz sont à une température très-élevée, et renferment beaucoup de matières combustibles. Ainsi, si on brûlait complétement ces gaz à leur sortie des fours, on pourrait utiliser une grande quantité de chaleur qui est ordinairement complétement perdue. On peut estimer au moins à 0,40 la perte en poids du combustible dans la fabrication du coke, et au même chiffre la quantité de houille équivalente à la chaleur perdue.

1006. La figure 8 (pl. 42) représente la disposition qui serait la plus convenable pour utiliser, en produisant de la vapeur, la chaleur perdue des fours à coke. A et A′, fours à coke; B, B′, cheminées des fours; D, D′,

tuyaux de fonte percés d'un grand nombre de petits orifices par lesquels l'air extérieur vient se mêler à la fumée; F, F', carneaux de circulation de l'air brûlé; G, G', bouilleurs; H, H', chaudières; I, I', registres qu'on tient fermés quand on charge ou quand on décharge les fours. La combustion s'effectuerait bien plus complétement si l'air était lancé dans les tuyaux avec une certaine vitesse. Les fours qui chauffent la chaudière devraient être assez nombreux pour que les chargements ayant lieu successivement et après des intervalles égaux, la quantité de chaleur produite n'éprouvât que de faibles variations.

1007. On a prétendu, comme nous l'avons déjà dit (239), qu'il n'y avait pas avantage à utiliser la chaleur perdue des fours à coke, parce qu'on augmentait ainsi le tirage, et que le trop grand volume d'air appelé dans le fourneau brûlait une portion du coke obtenu. Mais il est toujours facile de régler le volume d'air nécessaire à l'opération, et on peut utiliser la chaleur perdue sans qu'il en résulte aucune perte dans le rendement.

On a dit aussi que le coke fabriqué dans les fours dont on utilisait la chaleur perdue, était trop léger et ne pouvait pas servir aux opérations métallurgiques; mais il n'est pas douteux que les mauvais résultats obtenus provenaient uniquement de ce qu'on avait produit trop de tirage et qu'on avait fait marcher l'opération trop vite. Il est bien certain qu'en utilisant la chaleur perdue, et en réglant convenablement le tirage, on peut ne rien changer à la marche ordinaire des fours.

1008. Dans la plupart des usines métallurgiques, principalement dans celles qui ont pour objet la fabrication du fer, et qui sont les plus répandues, les opérations nécessitent des températures très-élevées, d'où il résulte une perte de chaleur très-considérable par les cheminées. Dans ces mêmes usines, on a besoin d'une grande puissance motrice, soit pour lancer le vent dans les foyers, soit pour le travail des métaux. On a cherché, dans ces dernières années, à utiliser la chaleur perdue des fourneaux pour faire mouvoir les machines, et on a complétement réussi. Alors, sur ces trois conditions qui étaient nécessaires pour la création d'une usine à fer, la proximité des minerais, celle du combustible et la jouissance d'un cours d'eau, la dernière a perdu presque toute son importance.

1009. Les foyers métallurgiques peuvent se diviser en deux classes :

La première comprend ceux dans lesquels le combustible est brûlé sur grille, et agit principalement par la flamme qu'il produit. L'air qui s'échappe de ces fours est presque entièrement brûlé, mais il est à une très-haute température.

La seconde comprend les fourneaux dans lesquels les matières que l'on veut chauffer, réduire ou fondre, sont mêlées avec le combustible et forment des couches d'une grande épaisseur, circonstance qui occasionne toujours la formation d'une grande quantité d'oxyde de carbone, et de différents carbures d'hydrogène.

1010. La première classe renferme tous les fourneaux à réverbère, les fours à réchauffer, les fours d'affinage (fours à pudler). L'utilisation de la chaleur perdue dans ces fours, pour la formation de la vapeur, est très-simple; il suffit de faire circuler la flamme et l'air brûlé qui sortent du fourneau, dans des chaudières convenablement disposées, et de faire écouler dans l'atmosphère l'air brûlé refroidi, par une cheminée d'une section et d'une hauteur suffisantes.

1011. Les figures 1, 2, 3, 4 et 5 (pl. 43) représentent les détails de construction d'une chaudière à vapeur établie à la suite de deux fours à pudler, à Abenville.

La figure 1re est une coupe longitudinale dans le sens de l'axe des bouilleurs et de la chaudière. La figure 2 est une coupe de la chaudière perpendiculaire à la précédente. La figure 3 est une coupe horizontale de la chaudière et des fours. Enfin les figures 4 et 5 représentent deux coupes verticales, perpendiculaires entre elles, des cheminées des fours. L'inspection seule des figures suffit pour faire comprendre la disposition de ce système. Chaque four chauffe un bouilleur et la moitié de la chaudière, et a une cheminée spéciale placée entre les deux fours. On peut à volonté faire passer l'air brûlé autour de la chaudière ou directement dans la cheminée. Au-dessous des bouilleurs se trouvent deux grilles qui servent à chauffer directement la chaudière quand les fours ne marchent pas.

1012. La consommation moyenne des fours à pudler est de 85 kilogr. de houille à l'heure; celle des fours à réchauffer est de 100 à 110. Les sections des cheminées des fours à pudler et à réchauffer sont ordinairement calculées sur une consommation de 4 kilogr. à $4^k,5$ de houille par heure et par décimètre carré, et les surfaces des grilles sont quatre fois plus grandes que celles des cheminées. Mais, pour que le passage de l'air

brûlé autour des chaudières ne ralentisse pas le tirage, il est important de donner aux carneaux et à la cheminée une plus grande section. D'après M. Grouvelle, la section doit être calculée en prenant $0^{m.c.},01$ pour une consommation de 3 kilogr. à $3^{k},3$ de houille par heure; on a reconnu par expérience que ces proportions étaient très-bonnes. Il y aurait de l'avantage à donner encore à la cheminée une plus grande section.

Quant à la surface de chauffe, on peut la déterminer comme si le foyer du four était placé sous la chaudière, parce que, comme nous le verrons plus bas, l'effet du combustible est à peu près le même pour la même étendue de surface de chauffe. On pourrait penser qu'il est utile d'employer des surfaces de chauffe beaucoup plus grandes que pour les appareils ordinaires, attendu qu'aucune partie des chaudières n'est chauffée par rayonnement; mais cet accroissement de surface n'est pas nécessaire, attendu que la flamme arrive sous la chaudière, et que l'air brûlé est à une température beaucoup plus élevée que dans les appareils ordinaires.

1013. D'après des expériences rapportées par M. Grouvelle (Guide du chauffeur), les chaudières placées à la suite des fours à réchauffer, produisent de 4 à 5 kilogrammes de vapeur à 5 atmosphères par kilogramme de houille brûlée sur la grille, et celles qui sont placées à la suite des fours à pudler, produisent seulement de 3 kilogr. à $3^{k},5$. Mais, d'après d'autres renseignements, les effets produits par ces derniers sont plus considérables et beaucoup plus voisins de ceux qu'on obtiendrait en brûlant le combustible sous les bouilleurs; la quantité de vapeur produite par les fours à pudler est de 4 kilogr. à $4^{k},5$ de vapeur par kilogramme de houille, et la quantité de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe et par heure est de 16 à 18 kilogrammes.

Mais comme dans tous ces fours il se dégage une certaine quantité de gaz combustibles quand on charge les foyers, et même que ce dégagement continue d'avoir lieu pendant toute la combustion, à cause de la grande épaisseur de la couche de combustible et du faible tirage, circonstances qu'on ne peut pas modifier, parce que l'air brûlé ne doit pas être oxydant, on augmenterait beaucoup l'effet produit dans les chaudières à vapeur en brûlant complétement les gaz à la sortie des fours par un jet d'air chaud.

1014. Dans certaines usines, les circonstances locales exigent que l'on place

les chaudières au-dessus des fours ; cette disposition n'est pas commode, parce qu'il est alors difficile de rendre les deux fourneaux indépendants.

1015. Les figures 6 et 7 (pl. 43) représentent une autre disposition de chaudière à vapeur chauffée par l'air brûlé de deux fours à réchauffer. Les surfaces de chauffe sont évidemment trop petites, et l'appareil doit produire beaucoup moins de vapeur que celui que nous avons décrit d'abord.

1016. Dans les foyers de la seconde classe, la chaleur perdue ne consiste pas uniquement dans la haute température des gaz qui s'échappent, mais principalement dans la grande quantité de gaz combustibles qui sortent avec l'air brûlé ; ainsi, il ne suffit pas, pour utiliser la chaleur perdue, de refroidir les gaz, il faut avant les brûler complétement.

Les hauts fourneaux qui produisent la fonte sont en première ligne ; les gaz qui se dégagent sont composés presque uniquement d'oxyde de carbone et d'azote, quand on emploie du coke et du charbon de bois ; et ils renferment en outre des carbures d'hydrogène quand le fourneau est alimenté par du bois incomplétement carbonisé ou par de la houille crue, comme cela a lieu en Écosse. D'après M. Bunten, dans les fourneaux qui marchent au charbon de bois, les gaz qui s'échappent du gueulard sont composés de la manière suivante : azote 60,94, acide carbonique 3,49, oxyde de carbone 32,59, hydrogène 2,32, hydrog. proto-carboné 0,66.

En admettant que les gaz combustibles soient composés seulement d'oxyde de carbone, on trouve que leur combustion complète peut développer une quantité de chaleur égale à $(7170 - 1386) : 7170 = 0{,}80$ de celle qui correspond à la quantité de charbon introduit dans le fourneau (271), et cette quantité de chaleur est encore beaucoup plus grande quand les combustibles sont incomplétement carbonisés.

L'expérience a démontré qu'en utilisant la chaleur perdue, dans un haut fourneau au charbon de bois, on pouvait produire la quantité de vapeur nécessaire pour alimenter la machine soufflante, chauffer à 300° l'air d'injection, et qu'il restait encore de la chaleur disponible.

1017. Le moyen d'abord employé pour recueillir les gaz qui s'échappent du gueulard des hauts fourneaux, consiste à fermer de tous côtés les cheminées placées ordinairement au-dessus, en ne laissant qu'une porte pour l'introduction des charges, et une ouverture par laquelle les gaz se rendent sous la chaudière placée latéralement à la hauteur du gueulard, ou au-dessous à une distance plus ou moins grande. Cette

distance peut être très-considérable; mais il est avantageux de la diminuer autant que la localité le permet, parce que les gaz se refroidissent d'autant plus qu'ils parcourent un plus long trajet, et que ce refroidissement non-seulement occasionne une perte de chaleur, mais encore rend la combustion complète des gaz plus difficile. A leur arrivée sous les chaudières, les gaz reçoivent des jets d'air extérieur et sont enflammés, et la flamme et l'air brûlé circulent dans des carneaux autour des chaudières. C'est ainsi qu'est disposé le premier appareil construit par MM. Thomas et Laurens, à la forge d'Échalonges (Haute-Saône), qui fonctionne régulièrement depuis 1835 sans que la marche du haut fourneau ait éprouvé la moindre variation. L'emploi de la moitié des gaz dégagés suffit pour produire le mouvement de la soufflerie.

1018. Ce moyen de recueillir les gaz au gueulard des hauts fourneaux présente plusieurs inconvénients; l'écoulement des gaz cesse lorsqu'on charge le fourneau; il faut alors maintenir constamment en activité un foyer additionnel, placé sous les chaudières, dans le double but de suppléer aux intermittences de chauffage par les gaz, et de rallumer ceux-ci après chaque interruption; en outre, si les tuyaux viennent à s'obstruer par une cause quelconque, la pression dans le haut fourneau peut s'élever d'une manière nuisible, et même les carneaux étant complétement ouverts, la formation subite d'une grande quantité de gaz dans le haut fourneau, comme cela a lieu quelquefois, peut présenter des dangers, le gueulard étant fermé. MM. Thomas et Laurens ont depuis employé une disposition qui produit un écoulement continu sans exiger la fermeture du gueulard :

Cette disposition consiste à placer au-dessus du fourneau un cylindre en briques d'un diamètre un peu plus grand, dans lequel on place un cylindre en tôle ou en fonte, de même hauteur, d'un diamètre égal à celui du gueulard, et garni à la partie supérieure d'un rebord qui s'appuie sur le cylindre en maçonnerie (fig. 1re, pl. 44). La capacité du cylindre métallique doit dépasser le volume d'une charge. Voici maintenant l'effet de cette disposition : au ventre du fourneau les gaz sont uniformément répartis dans la section, et comme ils tendent à s'élever verticalement, ils se rendent en grande partie contre les parois inclinées de la cuve, où ils éprouvent d'ailleurs moins de frottement, par conséquent ils viennent naturellement dans l'espace vide annulaire qui règne autour du cylindre

métallique, d'où ils s'écoulent par un tuyau dans les foyers à gaz. Le volume de gaz qui se dégage par le cylindre est très-petit relativement au volume total; car ces deux volumes sont à peu près dans le rapport de la section du gueulard à celle de la cuve, rapport qui, dans beaucoup de hauts fourneaux, est à peu près celui de 1 à 10; et d'ailleurs cette faible quantité de gaz perdus est en partie utilisée pour sécher et commencer à échauffer les matières contenues dans le cylindre. En ayant soin qu'à la fin de chaque charge il reste encore dans le cylindre une hauteur de minerai et de charbon de $0^m,40$ à $0^m,50$, les gaz peuvent être conduits à plus de 50 mètres du gueulard, et leur écoulement est sensiblement constant. Par cette disposition on ne change rien à la marche habituelle du fourneau.

Si les chaudières peuvent être placées près du gueulard, les gaz étant encore chauds s'allument très-facilement et il suffit de faire arriver de l'air par plusieurs orifices. Mais si les chaudières sont placées à une grande distance, il convient, pour avoir une bonne combustion, de diviser beaucoup les gaz et d'y lancer l'air en lames minces ou en petits jets (678) (680).

1019. Pour une chaudière alimentant une machine de 18 chevaux, à détente et à condensation, on obtient de très-bons résultats en prenant $0^m,28$ pour la section des carneaux et de la cheminée, une hauteur de cheminée de 8 mètres, et une surface de chauffe calculée sur une production moyenne de 15 à 17 kilogrammes de vapeur par mètre carré et par heure. (MM. Thomas et Laurens.)

Mais toutes les formes de chaudières ne sont pas également bonnes; les chaudières à tubes intérieurs ne conviennent pas, parce que le contact du métal éteindrait promptement la flamme; il faut, surtout près du foyer et dans une grande partie de la circulation, qu'il y ait beaucoup de surfaces de briques échauffées, qui par leur haute température maintiennent la combustion.

1020. La planche 44 représente deux systèmes différents de chaudières chauffées par les gaz qui sortent du gueulard d'un haut fourneau, construites par MM. Thomas et Laurens.

Les figures $1^re$ et 2 représentent une coupe verticale d'une chaudière destinée à une machine de 12 chevaux. Cette disposition permet de placer les chaudières près des gueulards, dans presque toutes les localités.

Les figures 3, 4, 5, 6 et 7 représentent diverses coupes d'une chaudière

à vapeur destinée à une machine de 50 chevaux pour une soufflerie d'un haut fourneau marchant au coke. Le foyer à gaz est disposé comme nous l'avons indiqué (678).

1021. Les foyers d'affinerie et de chaufferie, quoique ayant peu de hauteur, rentrent, quant à l'utilisation de leur chaleur perdue, dans la même classe que les hauts fourneaux, car il s'en dégage beaucoup d'oxyde de carbone, qui brûle très-facilement à la sortie du foyer à cause de sa haute température. Un feu d'affinerie au charbon de bois, qui produit de 22 à 24 mille kilogrammes de fer par mois, peut fournir par sa chaleur perdue de 150 à 180 kilogrammes de vapeur par heure; quantité beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire pour faire marcher sa soufflerie et son marteau. Cette vaporisation peut être produite par une chaudière de 16 mètres carrés de surface de chauffe, même en plaçant entre le foyer et la chaudière un petit four, où l'on commence à chauffer la fonte qui doit être affinée, ainsi que le fer à forger. Ces résultats ont été obtenus par MM. Thomas et Laurens aux forges de Gorcy (Moselle), et à celles de la Hutte (Vosges).

1022. Jusqu'ici on n'a pas utilisé la chaleur perdue des cubilots, du moins pour produire de la vapeur; on ne l'a employée qu'en partie pour chauffer l'air d'alimentation. La quantité de vapeur qu'on pourrait produire excède de beaucoup celle qu'exigerait la machine soufflante.

1023. Dans l'établissement des chaudières à chaleur perdue des foyers métallurgiques, il est important de remarquer que le développement de la chaleur, et par conséquent la production de la vapeur, n'est pas uniforme, et cela arrive surtout pour les feux d'affinerie, tandis que le travail de la machine doit être constant, ou, ce qui est encore plus défavorable, il doit varier dans des limites assez étendues, et atteindre souvent son maximum précisément dans les instants où la chaudière reçoit le moins de chaleur. Pour remédier à cet inconvénient, il faut calculer le volume d'eau des chaudières, et l'excès de pression qu'elles doivent supporter, de manière à accumuler pendant le temps du plus grand chauffage la quantité de chaleur nécessaire à l'excès de dépense de vapeur sur sa production, quand le chauffage se trouve diminué. Il convient aussi d'alimenter les chaudières dans les instants où l'on dépense le moins de vapeur; et pour cela, il est utile d'employer de petites machines spéciales.

## § 14. — EXPLOSIONS DES CHAUDIÈRES A VAPEUR.

1024. Les chaudières à vapeur éclatent quelquefois; l'eau bouillante et les parties désunies de l'enveloppe sont projetées au loin avec une grande force, renversent les obstacles qu'elles rencontrent, et il en résulte souvent les plus terribles accidents. Ces catastrophes se reproduisent trop souvent pour qu'on ne cherche pas à les prévenir; mais elles sont cependant assez rares relativement au nombre des chaudières qui travaillent, pour que l'on soit assuré que les circonstances qui les produisent se réalisent difficilement.

La première chose dont il faut s'occuper, c'est de déterminer exactement dans chaque cas, les circonstances qui ont accompagné l'explosion; mais le plus souvent les témoins en ont été les premières victimes, et il a été impossible d'obtenir de renseignements directs; cependant, dans un grand nombre de cas, les renseignements qu'on a pu recueillir, et l'examen des débris des appareils, ont permis de reconnaître, avec assez de probabilité, les causes des explosions qui ont eu lieu.

Je rapporterai d'abord un certain nombre d'exemples empruntés à une notice de M. Arago, qui a été imprimée dans l'*Annuaire* de l'année 1830.

1025. *Explosions produites par une surcharge des soupapes de sûreté.* Le bateau à vapeur *le Rhône,* construit par MM. Aitkin et Steel, était destiné à faire l'office de remorqueur entre Arles et Lyon; il portait une machine alimentée par quatre chaudières cylindriques en fer laminé de $1^{m},3$ de diamètre. Le 4 mars 1827, pendant qu'on se préparait à l'expérience qui, ce jour-là, devait avoir lieu en présence de toutes les autorités de Lyon, le bateau fit explosion. Plusieurs personnes, M. Steel entre autres, périrent victimes de cet accident. Il y eut même des spectateurs tués sur le quai du Rhône par quelques pièces de charpente du bateau. Le pont tout entier fut projeté à une grande distance; les tirages et les tuyaux de la cheminée, pesant plus de 30 quintaux, s'élevèrent presque verticalement jusqu'à une hauteur considérable; le dôme d'une des chaudières, pesant plus de 20 quintaux, alla tomber

à 250 mètres du point de départ; la séparation avait eu lieu suivant deux lignes horizontales, quoique dans cette direction le métal présentât des variations d'épaisseur de plus de 2 millimètres. Deux des chaudières éclatèrent presque simultanément; en retirant du Rhône une troisième, on reconnut qu'elle avait aussi éclaté.

Cette horrible catastrophe fut une conséquence inévitable de l'imprudence de l'ingénieur. Contrarié de ne pas vaincre la rapidité du courant aussi complétement qu'il l'avait espéré, M. Steel fixa invariablement les soupapes de sûreté des quatre chaudières. Ce fait a été constaté de manière à ne laisser aucun doute.

1026. A la suite de l'explosion qui détruisit entièrement la raffinerie de sucre de Wellclose-Square à Londres, il a été constaté que, peu d'instants avant l'événement, un agent du constructeur, contrarié des faibles résultats qu'il obtenait, malgré les vives représentations des raffineurs, avait chargé les soupapes d'un poids énorme, tandis qu'en même temps il poussait le feu autant que possible. La chaudière était en fonte, d'une épaisseur très-inégale; au fond elle avait 2 pouces $\frac{1}{4}$ anglais, sur les parois verticales 1 pouce $\frac{1}{2}$, à la partie inférieure du dôme $\frac{7}{16}$ de pouce, et sur quelques points $\frac{1}{8}$ seulement.

1027. Durant l'enquête que la chambre des communes institua en 1817, M. William Chapman, ingénieur civil de Newcastle, cita l'explosion d'une chaudière causée par l'imprudence d'un ouvrier qui s'assit sur la soupape pour donner à ses camarades le spectacle du mouvement oscillatoire qu'il éprouverait, disait-il, quand la vapeur serait devenue assez forte pour le soulever. La chaudière, comme cela devait arriver, fit explosion et les éclats blessèrent et tuèrent un grand nombre de personnes.

1028. En Amérique, un bateau à vapeur sauta sur l'Ohio, pendant que l'équipage levait l'ancre. Il n'y avait point de consommation de vapeur, et cependant l'ingénieur avait placé sur les soupapes un poids additionnel.

1029. *Explosions précédées de l'ouverture de la soupape de sûreté.* Dans l'explosion d'une chaudière à vapeur en fonte, à Essonne, en 1823, dont nous parlerons plus loin, il a été constaté que, peu d'instants avant l'explosion, les deux soupapes de sûreté s'étaient soulevées, et que les orifices laissaient écouler de la vapeur en abondance.

Une chaudière à vapeur à basse pression fit explosion dans un atelier

de Lyon, immédiatement après qu'on ent ouvert un large robinet de décharge par lequel la vapeur commençait à s'échapper avec rapidité. Ce fait remarquable eut pour témoin M. Gensoul. Depuis, MM. Tabareau et Rey, de Lyon, ont constaté, par des expériences directes sur une petite chaudière à vapeur, qu'en ouvrant un large robinet de décharge la soupape se soulevait.

1030. *Explosions précédées d'un grand affaiblissement dans la tension de la vapeur.* Quelques instants avant que la chaudière en fonte à moyenne pression, établie à Essonne dans la filature de M. Feray, fît explosion, le 8 février 1823, la machine qu'elle alimentait marchait plus lentement qu'à l'ordinaire, et à tel point que les ouvriers s'en plaignaient.

Quelques jours après l'explosion d'Essonne, un accident semblable arriva sur le boulevard du Mont-Parnasse, à Paris. Les ouvriers murmuraient de la lenteur des mouvements de la machine, lorsque la chaudière éclata. La chaudière était en cuivre laminé. Rien n'annonçait que les soupapes fussent en mauvais état; il est même probable que l'explosion fut précédée de leur ouverture.

Lors de l'explosion du bateau à vapeur *l'Etna,* en Amérique, la machine ne donnait que 18 coups de piston par minute, tandis que, dans sa marche habituelle, elle en donnait 20.

Lors de l'explosion du bateau *le Rapide,* à Rochefort, le manomètre indiquait une pression de 15 centimètres, et il en avait souvent marqué 30 dans la journée.

Il a été constaté que, peu d'instants avant l'explosion du bateau *le Graham,* on venait d'ôter un poids de 20 livres de dessus la soupape de sûreté.

1031. *Explosions précédées d'un grand échauffement des parois.* Dans la fonderie de Pittsburg, en Amérique, une machine à haute pression, de la force de 80 chevaux, recevait la vapeur de trois chaudières cylindriques séparées, ayant chacune 30 pouces anglais de diamètre et 18 pieds de long. On s'était aperçu, depuis assez longtemps, qu'à cause de quelque défaut dans un tuyau aboutissant à la pompe alimentaire, l'une de ces chaudières ne recevait pas assez d'eau et devenait rouge; mais comme la vapeur fournie par les deux autres chaudières était suffisante, on crut pouvoir se dispenser de faire les réparations nécessaires.

Un jour la chaudière rougie fit explosion; la majeure partie se sépara de l'une des extrémités, et partit comme une fusée sous un angle d'environ 45°, traversa le toit du bâtiment, et alla tomber à 680 pieds anglais de distance.

1032. *Explosion d'une chaudière en l'air.* M. Perkins a eu connaissance de l'explosion d'une chaudière qui a été précédée de la formation d'une fissure par laquelle la vapeur s'échappait avec une énorme vitesse. La chaudière fut détachée de la maçonnerie sur laquelle elle reposait, soulevée en masse à quelques pieds du sol, et c'est en l'air qu'eut lieu l'explosion qui la partagea en deux. La moitié supérieure s'éleva très-haut; l'autre retomba aussitôt sur le sol avec un grand fracas.

1033. Les mêmes circonstances paraissent s'être rencontrées dans l'explosion de Lochrin, immense distillerie située près d'Edimburgh. En 1814, les vases distillatoires furent disposés de manière à être chauffés par la vapeur. La vapeur était fournie par une chaudière de Watt, en fer forgé, de plus de $\frac{1}{3}$ de pouce d'épaisseur, de 37 pieds anglais de longueur, ayant 3 pieds de largeur au fond, et 2 pieds à la naissance du couvercle, enfin, de 4 pieds de hauteur. Le poids total de cette chaudière était de 180 quintaux. La chaudière était garnie de deux soupapes ayant chacune la charge relative à 4 atmosphères; l'une d'elles était sous une cage grillée fermée à clef.

Douze jours après l'établissement du système de chauffage à vapeur, la chaudière éclata.

Au moment de la catastrophe, la chaudière se partagea en deux parties inégales par 2 lignes de niveau suivant deux rangées de clous. La partie supérieure, composée du couvercle et des deux côtés, pesant 140 quintaux, fut projetée de bas en haut avec une telle violence, qu'après avoir traversé la voûte en briques qui couvrait l'atelier et le toit, elle s'éleva à une hauteur verticale de 70 pieds anglais. Cette énorme masse tomba ensuite à 150 pieds du point de départ, sur un bâtiment de la distillerie; et, au terme de sa chute, elle réduisit en pièces une vaste cuve de fonte située au rez-de-chaussée. Le fond de la chaudière, du poids de 40 quintaux, fut soulevé à une hauteur de 14 à 15 pieds et transporté à quelques pas de distance du massif de maçonnerie; sa courbure avait changé de forme, la surface inférieure, qui était concave avant l'explosion, était convexe après. Il y avait malheureuse-

ment deux ouvriers près de l'appareil au moment de l'explosion : tous deux perdirent la vie; le corps de l'une des victimes fut partagé en deux, les jambes restèrent dans la distillerie, tandis que le buste fut retrouvé au loin parmi les décombres.

1034. *Accidents particuliers aux chaudières à foyer intérieur.* Les petits cylindres des chaudières à foyer intérieur s'écrasent quelquefois, se déchirent, et l'eau bouillante, lancée par torrent dans les ateliers, produit souvent de grands malheurs.

Dans le *Flintshire,* aux Mold-Mines, il y a une immense machine à vapeur alimentée par trois chaudières à foyer intérieur. Un jour, la machine était arrêtée depuis cinq minutes; le contre-maître avait déjà levé les portes des foyers des trois chaudières et fermé les registres de deux d'entre elles; il s'occupait à faire la même opération sur la troisième, mais à peine la plaque métallique fut-elle en place, qu'il vit une bouffée de flamme s'élancer du foyer vers l'atelier, et une explosion suivit immédiatement. Deux ouvriers, qui se trouvaient dans la direction suivant laquelle s'élança l'eau bouillante, périrent sur-le-champ. Les cylindres extérieurs n'avaient ni bougé ni éprouvé aucun dommage. Le poids suspendu à la soupape de sûreté était encore à sa place après l'accident. Le petit cylindre n'avait pas non plus éprouvé de mouvement de translation, mais il était aplati et déchiré dans une grande partie de sa longueur.

A la mine d'étain de Polgooth, où deux chaudières à foyer intérieur firent explosion, on trouva les cylindres extérieurs intacts et les cylindres intérieurs tordus et crevassés dans un grand nombre de points.

A la mine d'*Est-Crennis,* le petit cylindre intérieur était non-seulement aplati par le rapprochement des parois, mais il avait été lancé hors de l'atelier avec beaucoup de force, sans que le grand cylindre qui l'enveloppait eût bougé, et sans qu'il eût éprouvé aucune avarie.

1035. *Écrasement des chaudières à basse pression.* Dans toutes les grandes villes manufacturières, on a eu plusieurs exemples d'écrasement de chaudières à basse pression; mais ces accidents n'ont jamais eu les suites fâcheuses des explosions causées par un excès de pression intérieure.

1036. L'explosion du bateau à vapeur *le Parisien,* qui a eu lieu le 23 juin 1839, paraît avoir été occasionnée par l'inclinaison du bateau

dans une station, inclinaison qui mit à découvert d'un côté une partie de la surface de chauffe.

1037. D'autres explosions, rapportées dans le tome 20 des Annales des mines, paraissent avoir eu pour causes, les unes l'altération du métal par des eaux d'alimentation acides, les autres une trop faible résistance des chaudières, provenant ou de la mauvaise qualité de la tôle, ou d'une mauvaise construction.

1038. Indépendamment de ces explosions, qui heureusement sont rares, il arrive aux chaudières à vapeur des accidents qui ont beaucoup moins de gravité; la vapeur et l'eau s'échappent quelquefois par des fissures qui se produisent dans les joints. Quand les jets n'ont qu'une petite section et qu'ils ne lancent que de la vapeur, il n'en résulte jamais de graves inconvénients; il en est de même quand ils lancent de l'eau et qu'ils sont dirigés dans l'intérieur du fourneau; mais quand ils sont extérieurs, ils occasionnent souvent de grands accidents.

1039. Plusieurs physiciens avaient prétendu qu'un accroissement graduel de pression ne pouvait pas donner lieu aux explosions fulminantes, qu'il ne pouvait occasionner que des déchirures partielles de la chaudière et des jets de vapeur ou d'eau; et que, pour expliquer ces grandes explosions, il fallait avoir recours à la formation instantanée d'une grande quantité de vapeur. Mais nous avons rapporté des exemples d'explosions qui, sans aucun doute, ont été provoquées par la surcharge des soupapes de sûreté; d'ailleurs, des expériences faites en Amérique par l'Institut Franklin, dans lesquelles on a fait éclater, avec toutes les circonstances des explosions fulminantes, des chaudières de fer et de cuivre hermétiquement fermées, ne peuvent laisser aucune incertitude à cet égard. Les explosions fulminantes peuvent même se produire dans des vases renfermant de l'air ou un gaz comprimé; je citerai l'explosion d'un réservoir dans lequel du gaz propre à l'éclairage était comprimé par une pompe, et dont M. Arago a été témoin, et enfin l'explosion plus récente encore d'un appareil de M. Thilorier, pour la congélation de l'acide carbonique, qui a occasionné un si funeste accident.

1040. On conçoit facilement qu'une déchirure peu étendue dans une chaudière puisse ne donner lieu qu'à des jets de vapeur et d'eau, et n'occasionner aucun ébranlement dans la masse; mais si l'eau est à une température élevée, de manière à pouvoir produire un grand volume

de vapeur, la diminution de résistance provenant d'une déchirure partielle peut occasionner la séparation complète d'une partie de la chaudière qui, étant pressée par la vapeur pendant une partie de son mouvement, peut recevoir une impulsion qui la projette à une grande distance; et la réaction provenant de ce mouvement et celle qui résulte de l'écoulement de l'eau, peuvent alors occasionner de grands dérangements dans le reste de l'appareil.

1041. On a donné un grand nombre d'explications différentes des explosions qui semblent provenir d'un excès de force élastique de la vapeur : nous rapporterons les principales.

1042. Voici d'abord l'explication donnée par M. Perkins, et qui est assez généralement admise. Imaginons que, par une cause quelconque, le niveau de l'eau baisse dans une chaudière; les parties de la surface qui sont en contact d'un côté avec l'air brûlé, et qui ne sont en contact par l'autre face qu'avec de la vapeur, prendront une température très-élevée; la vapeur s'échauffera de beaucoup au-dessus de la température du liquide, et enfin la surface du liquide en contact avec la chaudière diminuant, la quantité de vapeur formée, malgré l'activité du foyer, ira aussi en diminuant. Ainsi, la marche de la machine se ralentira. Dans cet état, si on ouvre une soupape de sûreté ou un tuyau de dégagement, de manière à diminuer la pression intérieure, il se formera une grande quantité de vapeur aux dépens de la température de l'eau elle-même; cette émission de vapeur, qui partira simultanément de tous les points de la masse liquide, produira une augmentation de volume analogue à celle des eaux gazeuses ou du vin de Champagne quand on débouche une bouteille; alors, cette mousse pénétrant dans la chambre de vapeur à une haute température, il se formera, dans un temps très-court, une grande quantité de vapeur; la pression augmentera subitement; la soupape de sûreté se soulèvera; mais la quantité de vapeur qu'elle laissera écouler n'étant point suffisante, la chaudière éclatera.

Cette explication repose, comme on voit, sur trois points : 1° abaissement du niveau de l'eau et échauffement de la partie supérieure de la chaudière; 2° expansion en mousse de l'eau par une diminution de pression; 3° formation instantanée d'une grande quantité de vapeur par cette mousse, en pénétrant dans la chambre à vapeur.

Le premier point est évident; car aussitôt qu'une partie de la surface de chauffe n'est pas baignée par l'eau, comme la chaleur se dissipe très-peu par la vapeur, il en résulte nécessairement que la paroi de la chaudière s'échauffe, et on conçoit qu'elle puisse être portée jusqu'au rouge. L'événement de Pittsburg, que nous avons rapporté, vient à l'appui de ce fait, et un grand nombre d'observations directes le justifient. M. Mogle découvrit une fois, en visitant les machines du Cornwall, qu'une échelle en bois, qui reposait par son pied sur le sommet d'une chaudière, avait pris feu. Dans un des paquebots qui font le voyage de Liverpool à Dublin, une planche de sapin, qu'on avait posée accidentellement sur le couvercle de la chaudière, s'était enflammée. Enfin, pour ne laisser aucun doute, nous rapporterons une expérience directe de M. Perkins. Une chaudière cylindrique, de 4 pieds de long sur un pied de diamètre, ayant été placée verticalement sur un fourneau, la base fut entourée de feu qui s'élevait au tiers de la hauteur, tandis que l'eau plus basse n'en baignait qu'un sixième; la soupape de sûreté, chargée d'environ 1 atmosphère, était placée sur le côté de la chaudière, à la moitié de la hauteur. On remplaçait l'eau transformée en vapeur que cette soupape laissait échapper au fur et à mesure de sa fuite. Un thermomètre, plongé dans l'eau et descendant jusqu'au fond du vase, marquait 104° centigrades. Un autre, plongé au milieu de la hauteur de la chaudière, accusait 260°; le couvercle de la chaudière était rouge (Annuaire de 1830).

Quant au second point, il est impossible de ne pas l'admettre également. On peut d'ailleurs faire à cet égard une expérience décisive : si on place sous une cloche reposant sur le plateau d'une machine pneumatique, un vase renfermant de l'eau ou de l'alcool, on voit, à chaque coup de piston, la vapeur s'élever en mousse à une hauteur plus ou moins considérable.

Ce fait a d'ailleurs été constaté directement par M. Jobard sur des bouilleurs en verre, et, par l'institut Franklin, sur une chaudière de fer garnie de regards en verre. La pression intérieure étant de 2 atmosphères, lorsqu'on ouvrait un orifice dont la section était égale à $\frac{1}{2055}$ de la surface de la chaudière, le bouillonnement remplissait la chaudière, et l'eau était lancée avec violence par l'orifice.

Mais le dernier point présente beaucoup d'incertitude. On conçoit faci-

lement que l'eau, lancée dans la partie supérieure de la capacité de la chaudière, à travers la vapeur très-dilatée et très-chaude qu'elle renferme, en absorbe très-promptement la chaleur; mais la quantité de chaleur que cette vapeur contient est peu considérable, et ne peut pas expliquer l'accroissement de pression que suppose l'explication de M. Perkins. Il faudrait alors admettre, comme le suppose M. Marestier, que la chaleur des parois de la chaudière concourt à la formation instantanée de la vapeur; mais des faits incontestables que nous rapporterons plus loin, ne permettent pas de supposer que cette chaleur puisse se transmettre assez rapidement à l'eau pour occasionner un grand accroissement de pression dans un temps très-court.

M. Perkins rapporte cependant une expérience qui constate la formation instantanée d'une grande quantité de vapeur par l'introduction de l'eau dans une chaudière vide à une température très-élevée. Un générateur plein d'eau à 260° communiquait avec un vase ne renfermant ni eau ni vapeur, et dont la température était de 650°, par un tube qu'une soupape convenablement chargée tenait ordinairement fermé. Lorsqu'on injectait de l'eau dans le générateur, un même volume d'eau chaude pénétrait dans le récipient, et la soupape de sûreté de ce dernier indiquait une pression de 100 atmosphères pour une injection abondante.

Mais dans ces expériences, l'eau était à une température très-élevée, le vase où se formait la vapeur avait une grande surface relativement à sa capacité, et l'épaisseur du métal était beaucoup plus considérable que celle de la tôle qu'on emploie pour les chaudières, de sorte que les résultats obtenus ne peuvent conduire à rien de certain sur ce qui se passe dans les circonstances ordinaires.

1043. J'ai dit que la haute température de la vapeur dilatée dans la chambre à vapeur ne peut pas produire une grande quantité de vapeur, à cause de la petite quantité de chaleur qu'elle renferme; les expériences suivantes démontrent que le contact de l'eau avec un métal incandescent ne produit qu'une évaporation très-lente. Les premières sont dues à Klaproth.

Lorsqu'on prend une cuiller de fer très-poli, et qu'après l'avoir chauffée jusqu'au blanc et enlevée du feu, on y fait tomber une goutte d'eau, celle-ci se divise d'abord en plusieurs gouttelettes d'inégale grosseur, qui se réunissent bientôt en une seule; en la regardant de près, on

observe qu'elle tourne rapidement sur elle-même, qu'elle diminue continuellement de volume et finit par éclater avec explosion. En faisant succéder une seconde goutte à la première, une troisième à la seconde, les mêmes phénomènes se reproduisent, mais la durée de la goutte sur le métal est d'autant plus courte que le métal est plus refroidi. Dans une expérience :

| | |
|---|---|
| La première goutte a duré | 40 secondes, |
| La seconde..... | 20 |
| La troisième..... | 6 |
| La quatrième..... | 4 |
| La cinquième..... | 2 |
| La sixième..... | 0 |

D'autres expériences ont présenté un décroissement semblable, mais qui n'était pas exprimé par les mêmes nombres.

En faisant tomber 7 gouttes, l'une immédiatement après l'autre, dans une cuiller de fer échauffée au point nécessaire, les gouttes se réunirent en une masse globulaire qui commença à tourner sur elle-même avec rapidité. D'abord, la masse était parfaitement ronde; ensuite elle se divisa par le haut, et l'on voyait une tache d'écume blanche sur la face supérieure; les bords paraissaient dentelés. Ce phénomène dura 150 secondes. Une expérience sur 10 gouttes dura 200 secondes. Avec un plus grand nombre de gouttes, l'expérience ne réussissait pas. Des vases d'argent et de platine ont donné lieu aux mêmes observations.

M. Perkins a observé le même phénomène dans un générateur de ses machines à haute pression. Le générateur étant rouge et ensuite rempli d'eau, la force élastique de la vapeur était d'abord très-petite, et s'est développée avec une grande rapidité à mesure que la température de la chaudière a baissé.

Dans ces phénomènes, l'eau n'est point en contact avec le métal, une couche de vapeur est interposée, et arrête la transmission de la chaleur; car la forme sphérique des gouttes d'eau sur le métal incandescent et leur mobilité à sa surface indiquent que le contact immédiat n'existe pas, ou du moins qu'il n'a lieu que par un petit nombre de points. Aussi, on peut rendre l'évaporation presque instantanée en établissant momentanément un contact forcé entre l'eau et le métal, par l'aplatissement des bulles résultant d'un choc brusque.

Cette suspension de l'eau, par une légère couche de vapeur, au-dessus du métal incandescent, paraît être due à une répulsion qui se manifeste entre les corps échauffés, et qui a été bien mise en évidence par une observation très-curieuse de M. Perkins, rapportée dans son mémoire sur les machines à haute pression, lu à l'Institut le 3 septembre 1827. A l'une des extrémités d'un générateur, se trouvait un orifice de $\frac{1}{8}$ de pouce de diamètre, auquel était ajusté un tube de fer de 3 pieds de longueur sur $\frac{1}{2}$ pouce de diamètre intérieur, portant un robinet; à l'autre bout du cylindre, il y avait une soupape de sûreté, chargée de 317 kilogrammes par pouce carré. Le cylindre étant chauffé au rouge, l'eau qu'il contenait força, par l'élasticité de sa vapeur, la soupape en question; mais on pouvait ouvrir le robinet du tube sans qu'il en sortît rien; donc à cette température les parois du cylindre retenaient l'eau et la vapeur à une distance d'au moins $\frac{1}{16}$ de pouce anglais; à une température inférieure, la vapeur finit par sortir à travers le tube.

L'institut Franklin a vérifié les faits dont nous venons de parler. Les expériences ont été faites sur huit bassins hémisphériques de 3 pouces de rayon, trois en cuivre, quatre en fer et un en fonte; ces vases ont été chauffés dans des bains d'huile ou d'étain fondu. Voici les résultats des observations : 1° avec le même métal la température du maximum de vaporisation de l'eau est d'autant plus basse que le poli de la surface est plus grand; pour le cuivre poli le maximum a lieu à 144°,4 centigrades, et pour le cuivre oxydé à 175°,4; et le rapport des temps nécessaires pour vaporiser la même quantité d'eau dans les deux cas, est comme 12 est à 1. Pour le fer poli, le maximum de vaporisation a lieu de 167 à 170°; pour le fer oxydé à 175°; pour le fer fortement oxydé à 194°, et les temps de la vaporisation ne diffèrent pas beaucoup. 2° Les temps de la vaporisation pour le cuivre et le fer, dans le même état, sont entre eux comme 2 : 1. 3° Les températures du maximum de vaporisation pour le fer et le cuivre fortement oxydés correspondent à une force élastique de la vapeur de 9 atmosphères environ. 4° La répulsion entre le métal et l'eau est parfaite de 11° à 22° au-dessus de la température correspondante au maximum de vaporisation; au delà de cette température, l'eau ne peut plus mouiller le métal.

Ainsi il ne peut rester aucun doute sur l'impossibilité de la formation instantanée, dans les chaudières ordinaires, d'une quantité de va-

peur suffisante, pour expliquer, par un grand accroissement de pression, les explosions dont il est question, et, par conséquent, sur l'insuffisance des explications de M. Perkins et de M. Marestier, à moins qu'on n'admette qu'un accroissement de pression peu considérable, mais subit, agissant comme un choc, ne puisse produire la rupture des chaudières; mais cette hypothèse est peu probable.

1044. On a aussi expliqué les explosions fulminantes, en admettant qu'une couche de sédiment, déposée au fond de la chaudière, lui avait permis de rougir; et que, par une cause quelconque, la croûte venant à se rompre, l'eau se trouvait en contact avec le métal incandescent, et qu'il se formait instantanément un grand volume de vapeur dont la tension produisait la rupture de la chaudière. Mais cette explication n'est pas plus admissible que la première, à cause de la faible épaisseur des chaudières, de la faible capacité calorifique du fer, et enfin à cause du temps qu'exige le passage de la chaleur du fer dans l'eau.

1045. M. Galy-Cazalat, tout en admettant pour causes de certaines explosions l'introduction de l'eau au-dessous des couches de dépôts soulevées où le métal est incandescent, et l'élévation du liquide en mousse contre les parois de la chaudière, qui ont été chauffées au rouge par un abaissement de niveau, admet encore une autre cause fondée sur les expériences suivantes. Lorsqu'on place dans un vase renfermant un bain à une température constante, un vase de verre ouvert, contenant de l'eau, l'ébullition se fait régulièrement, et la température de l'eau est de 100°. Mais si l'eau est recouverte d'une couche d'huile, l'ébullition n'est point régulière, et la température de l'eau peut s'élever jusqu'à 123°; alors une légère élévation de température détermine une formation instantanée de vapeur qui brise le vase. L'ébullition par intermittence a également lieu pour les dissolutions salines saturées. M. Galy-Cazalat admet que quand l'eau est couverte d'une couche d'huile, ce liquide s'oppose seulement à ce que l'eau reprenne de l'air à mesure qu'elle le perd par l'ébullition, et que de l'eau privée d'air se comporterait de la même manière. Il explique alors certaines explosions par l'absence d'alimentation qui laisse l'eau privée d'air et lui permet de prendre une température beaucoup plus élevée que celle qui correspond à la pression, et de produire instantanément une quantité de vapeur très-grande, d'où résulte une pression que la chaudière ne peut pas supporter, et contre la-

quelle les soupapes de sûreté sont sans efficacité. Pour que cette explication fût admissible, il aurait fallu démontrer, 1° que c'est bien l'absence seule de l'air qui, dans l'expérience que nous avons citée, a élevé la température de l'eau à 123° sous une couche d'huile; mais une expérience dans laquelle l'air a été recueilli sous une cloche pleine de mercure, et dans laquelle l'ébullition régulière s'est maintenue après l'expulsion de l'air, est complétement en opposition avec cette opinion; 2° que les mêmes phénomènes se produisent dans les vases métalliques; ce qui n'est pas probable, car tout le monde sait que les soubresauts qui accompagnent l'ébullition de l'eau dans le verre, n'ont pas lieu dans des vases métalliques, et que la température de l'ébullition de l'eau est moins élevée dans ceux-ci que dans les vases de verre. Ainsi cette explication n'est pas admissible.

M. Galy-Cazalat prétend aussi que les soubresauts qui résultent des dépôts qui se forment dans les chaudières, peuvent occasionner des mouvements de transport, sans qu'il y ait d'ouvertures; et pour le démontrer, il a fait des expériences en enflammant de la poudre dans un petit canon dont la bouche était fermée à vis, et il dit avoir observé des mouvements très-sensibles. Il faut nécessairement que les expériences aient été mal faites, car si les résultats qu'il a obtenus étaient exacts, ils seraient en opposition avec le principe de mécanique le plus évident qui existe, l'égalité entre l'action et la réaction.

1046. M. Jaquemet a donné dernièrement une explication des explosions complétement différente de celles dont il a déjà été question, et que nous rapporterons sommairement. M. Jaquemet a reconnu par expérience que quand on ouvre une issue à la vapeur qui se forme dans une chaudière, si la section est très-petite relativement à la surface de chauffe, il ne se dégage que de la vapeur; si la section augmente, il sort un mélange d'eau et de vapeur, dans lequel l'eau est d'autant plus abondante que la section est plus grande, et qu'à une certaine limite de section, inférieure à celle qu'on donne communément à chacune des soupapes et à la plus petite plaque fusible, il ne sort plus que de l'eau. Il résulte de ce fait, que quand on ouvre une large issue à la vapeur, la vitesse d'écoulement du mélange d'eau et de vapeur étant beaucoup plus petite que celle de la vapeur pure, malgré la plus grande densité du mélange, la quantité de chaleur entraînée hors de la chau-

dière pourrait être plus petite que celle qu'elle reçoit dans le même temps, et, par suite, que la tension de la vapeur augmenterait constamment jusqu'à la rupture de l'appareil. Cette explication suppose nécessairement qu'en ouvrant un large orifice à l'écoulement de la vapeur, la pression dans la chaudière augmente. Mais ce fait que M. Jaquemet a observé un grand nombre de fois et qui l'avait été avant lui (1029), n'a pas été constaté depuis. Il était probablement dû à certaines circonstances particulières aux chaudières dont on s'est servi.

1047. Enfin, on a expliqué les explosions fulminantes par la détonation d'un mélange d'hydrogène et d'air ; l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau sur le métal incandescent, ou de celle des matières grasses entraînées par l'eau d'alimentation, et l'air, de la pompe alimentaire dont le tube d'aspiration ne plongerait pas dans l'eau, ou dont certains joints ne seraient pas parfaitement étanches ; l'inflammation du mélange détonnant serait due au contact du métal incandescent, ou à une étincelle électrique résultant de l'électricité produite par la vaporisation (1).

Cette dernière explication des explosions, proposée il y a longtemps, a été reproduite récemment par M. Jobard, qui la regarde comme pouvant seule rendre compte d'une explosion qui a eu lieu à Gand, il y a quelques années ; la chaudière était froide, sans eau, ouverte, et la détonation eut lieu lorsqu'un ouvrier s'y introduisit avec une lampe pour la nettoyer. La formation de l'hydrogène dans les chaudières à vapeur a d'ailleurs été constatée par M. Seguier, dans plusieurs circonstances ; il a reconnu, dans une chaudière du faubourg Saint-Antoine, qu'il s'échappait de l'hydrogène avec la vapeur par la soupape de sûreté ; dans une autre, que ce gaz sortait par la pompe à air.

1048. En résumant ce qui précède, on doit regarder comme évident qu'il n'est pas nécessaire de supposer un développement brusque de vapeur, ou une cause quelconque qui diminue subitement la résis-

---

(1) La vapeur qui sort d'une chaudière est toujours chargée d'électricité. C'est M. Tassin, ingénieur belge, qui paraît avoir constaté ce fait le premier, du moins pour les chaudières à vapeur, car il a été découvert il y a longtemps, par M. Pouillet, mais par des expériences faites sur des vases d'une petite dimension. Depuis, M. Séguier a fait à ce sujet de nouvelles expériences, dans lesquelles il a pu obtenir des étincelles de plusieurs centimètres de longueur. (Comptes rendus de l'Académie des sciences, tome XIII).

tance de la chaudière, pour expliquer les explosions, car les faits que nous avons rapportés ne permettent pas de douter que les explosions les plus violentes ne puissent provenir d'un accroissement graduel de pression ou d'une diminution lente de résistance. On peut alors ranger en cinq classes les différentes causes de rupture des chaudières.

1° *Défauts de construction.* Ces défauts peuvent provenir ou de la mauvaise qualité de la tôle, ou de formes vicieuses dans la disposition de la chaudière. Les essais à la pompe de compression peuvent ne pas mettre ces défauts en évidence, parce qu'on opère à froid, et parce que les fuites ne se manifestent souvent que par une pression intérieure beaucoup plus prolongée que la durée ordinaire de ces expériences.

2° *Altération de la chaudière par un long usage.* Les chaudières s'altèrent toujours avec le temps, principalement par les fuites, autour desquelles le métal s'oxyde rapidement, et par les incrustations intérieures. Elles peuvent aussi s'altérer par des eaux d'alimentation acides. Alors la résistance diminue progressivement, et finit par atteindre la limite qui correspond à la pression.

3° *Surcharge des soupapes.* Cette cause d'explosion est d'autant plus efficace que, comme nous l'avons dit, l'excès de résistance des chaudières est peu considérable, malgré leur grande épaisseur, à cause de la clouure des feuilles de tôle et de la température élevée à laquelle le métal est soumis.

4° *Détonation d'un mélange explosif dans les carneaux.* C'est à cette cause qu'il faut attribuer les explosions de certaines chaudières à foyer intérieur. La détonation d'un mélange explosif a eu lieu, d'après M. Gay-Lussac, dans le fourneau d'une chaudière de concentration complétement ouverte, à la raffinerie de salpêtre établie à l'arsenal de Paris; le fourneau a été entièrement démoli, mais la chaudière n'a éprouvé aucune altération. Les mélanges explosifs se forment principalement quand on abaisse le registre et qu'on le lève ensuite subitement, ou qu'on ouvre la porte du foyer; par l'abaissement du registre, le combustible, quand il en est susceptible, éprouve une véritable distillation, qui remplit les carneaux de gaz combustibles, et par l'ouverture de la porte il arrive un excès d'air qui se mêle au gaz, et qui, dans certaines circonstances, produit une violente détonation. On

comprend même difficilement que ces accidents ne soient pas plus fréquents.

5° *Abaissement du niveau de l'eau.* Le niveau de l'eau s'abaisse au-dessous de la limite supérieure de la surface de chauffe, ou par l'inclinaison de la chaudière, si elle est sur un bateau, ou par la diminution de l'eau d'alimentation, ou par l'ouverture de la soupape de sûreté ou d'un orifice de dégagement qui laisse écouler une grande quantité d'eau à l'état d'émulsion. Cet abaissement du niveau de l'eau est ordinairement accompagné d'un affaiblissement de la puissance des machines, dû à la diminution d'étendue de la surface de l'eau en contact avec la chaudière, et il est suivi d'un grand échauffement des parties de la surface de chauffe qui ne sont pas mouillées par l'eau.

1049. Ce sont les explosions qui appartiennent à cette classe qui ont donné lieu à un si grand nombre d'explications différentes, mais dont aucune ne présente assez de probabilité pour être admise. La cause immédiate de la rupture des chaudières, quand, par l'abaissement du niveau de l'eau, une partie de sa surface a atteint la chaleur rouge, me paraît provenir uniquement de la diminution de résistance du métal; car, par le mode de fabrication des chaudières, la résistance est deux fois plus petite que celle qui correspond à l'épaisseur de la tôle (745), et on sait qu'à la chaleur rouge la résistance du fer est à peu près six fois plus petite qu'à froid; ainsi, quand une chaudière est chauffée au rouge, sa résistance est douze fois plus petite que la résistance qu'elle présenterait à froid si le métal était continu; or les chaudières ont rarement une épaisseur qui excède douze fois la résistance du fer à une traction correspondante à la tension de la vapeur qu'elles doivent former.

1050. Il est cependant probable que, dans certaines circonstances, il a pu se former, contre les parois de la chaudière, fortement échauffées par l'abaissement du niveau de l'eau, et à la suite de l'ouverture d'une soupape qui a soulevé de l'eau en émulsion, une quantité de vapeur plus grande que celle que la soupape a pu débiter dans le même temps, surtout si la température de la paroi se trouvait à la température du maximum de vaporisation, et que cette circonstance a pu concourir, avec l'affaiblissement de la résistance de la chaudière, à produire l'explosion. Il est possible aussi que, dans certaines circonstances, la cause d'explosion signalée par M. Jaquemet se soit réalisée; et que, dans

d'autres, l'explosion ait été provoquée par la détonation d'un mélange d'air et de gaz hydrogène; mais je pense que ces cas, s'ils ont existé, ont été très-rares.

1051. De tous les détails que nous venons de donner sur les explosions des chaudières, nous pouvons déduire que les précautions les plus importantes à prendre, soit dans la construction des chaudières, soit dans la direction de l'opération, sont les suivantes :

1° Employer, autant que possible, des chaudières cylindriques à bases circulaires, terminées par des calottes sphériques; éviter les formes de chaudières qui peuvent changer, car les armatures intérieures n'empêchent pas le métal de céder à l'influence des variations de pressions intérieures dans les intervalles qui les séparent, et ces flexions, qui se produisent très-fréquemment, diminuent la résistance de la tôle. Employer surtout, dans la construction des chaudières, des tôles de bonne qualité, non feuilletées, et de préférence celles qui ont été faites au charbon de bois.

2° Employer des soupapes de sûreté à rebords étroits, comme celle de M. Chaussenot; des tubulures à soupape d'arrêt pour les plaques fusibles; multiplier surtout les indicateurs de niveau : deux sont indispensables, un à tube et l'autre à flotteur; mais il serait utile d'employer un troisième flotteur à sifflet, qui ne fonctionnerait que quand le niveau serait descendu d'une certaine quantité au-dessous de la limite assignée. Il est important d'observer le dénivellement produit dans la chaudière par les bulles de vapeur qui se dégagent, car il en résulte que si, pendant le travail, le niveau était à la hauteur convenable, il descendrait d'une quantité plus ou moins grande quand on arrêterait l'émission de la vapeur, et qu'alors, si l'alimentation était produite par la machine, une partie de la surface de chauffe ne serait pas mouillée intérieurement et pourrait rougir; il faudrait alors que le chauffeur eût à sa disposition une petite pompe alimentaire, qu'il ferait mouvoir lui-même pour rétablir le niveau dans les temps d'arrêt.

Les plaques fusibles, du moins celles qui sont généralement employées, ne préviennent réellement qu'un excès de pression, dans le cas où les soupapes de sûreté ne fonctionneraient pas par une cause quelconque; car elles sont sans efficacité contre un échauffement

extraordinaire d'une partie de la surface de la chaudière, par un abaissement du niveau de l'eau, à cause de leur éloignement de la surface de chauffe; ainsi, avec des soupapes bien disposées, les plaques fusibles deviennent inutiles. Il n'en serait pas de même si les plaques fusibles étaient placées très-près des surfaces qui peuvent rougir; mais l'appareil serait trop compliqué.

3° Employer de bons systèmes d'alimentation; doubles autant que possible, surtout quand ils se composent d'une pompe, car le jeu de la pompe d'alimentation peut être interrompu par un grand nombre de causes, par l'introduction de quelques corps étrangers qui s'opposeraient à la fermeture d'un des clapets, par des fuites dans la garniture du piston, par l'adhérence d'un des clapets sur son siége.

4° Pour la haute comme pour la basse pression, employer exclusivement des manomètres à air libre.

5° Nettoyer souvent les chaudières, surtout si les eaux que l'on emploie forment beaucoup de dépôts, et, dans tous les cas, se servir des différents moyens indiqués pour éviter les incrustations.

6° Enfin, de toutes les précautions la plus importante, et malheureusement la plus négligée, c'est le choix d'un chauffeur sobre, actif et intelligent.

### § 15. — AMÉLIORATIONS DONT LES CHAUDIÈRES A VAPEUR SONT SUSCEPTIBLES.

1052. Les améliorations que l'on peut introduire dans les générateurs à vapeur sont de deux espèces : celles qui ont pour objet de diminuer les chances d'explosion, et celles qui ont pour but d'obtenir un plus grand effet utile du combustible consommé. Nous ne nous occuperons ici que de ce dernier genre d'amélioration; le paragraphe précédent renfermant tout ce que nous croyons utile de connaître sur le premier point.

1053. Considérons d'abord les générateurs fixes. Dans presque tous ces appareils, on obtient généralement de 5 à 6 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, tandis que la quantité de vapeur qu'on pourrait obtenir si toute la chaleur était utilisée, serait de $7500 : 650 = 11^{k},54$, l'eau d'alimentation étant à 0°; et $12^{k},3$ si l'eau d'alimenta-

tion était à 40°, comme dans la plupart des machines à condensation. Ainsi on n'utilise à peu près que la moitié de la chaleur développée. Cette perte énorme de chaleur provient d'une mauvaise combustion dans le foyer, par un appel d'air trop grand ou trop petit; de la haute température à laquelle l'air brûlé est abandonné dans la cheminée; et enfin, de la transmission de la chaleur à travers le fourneau.

Cette perte de chaleur correspond à une perte d'argent très-considérable pour les grands appareils; car, à Paris, une machine de 30 chevaux qui travaille 10 heures par jour, consomme annuellement pour plus de 22,000 francs de combustible.

1054. L'effet utile d'un combustible dans la production de la vapeur, peut être augmenté par une amélioration du foyer, un accroissement et une meilleure disposition de la surface de chauffe, et une augmentation de hauteur et de section de la cheminée, qui lui permette de produire le tirage nécessaire avec une plus faible température de l'air brûlé.

1055. On brûle le combustible dans les foyers sans se rendre compte des effets produits; mais, comme nous l'avons déjà dit, si la cheminée appelle un trop grand excès d'air, l'air brûlé se trouve à une trop basse température, et on n'utilise que la chaleur rayonnante du foyer; si, au contraire, l'appel n'est pas suffisant, il se forme de l'oxyde de carbone, et la combustion développe peu de chaleur. Dans chaque foyer et pour un même combustible, il y a plusieurs éléments à considérer, qui tous ont plus ou moins d'influence sur l'effet utile obtenu : la quantité de vapeur à produire par heure, la surface de la grille, l'épaisseur du combustible, et le tirage. Lorsque la quantité de vapeur à produire par heure est donnée, et c'est ce qui arrive presque toujours, ainsi que l'étendue de la surface de la grille, et que la cheminée a un excès de tirage, c'est-à-dire, qu'elle fonctionnne ordinairement avec le registre presque abaissé, on peut toujours, par quelques essais, déterminer l'épaisseur de la couche de combustible la plus avantageuse, soit par des analyses de l'air brûlé, soit en observant les quantités de combustible consommées pour produire le même effet, lorsqu'on fait varier la hauteur du combustible sur la grille. Si la cheminée n'avait pas un tirage suffisant pour permettre de donner à la couche de combustible l'épaisseur convenable, on pourrait augmenter la sur-

face de la grille ou produire un tirage artificiel, par un ventilateur, ou par un jet de vapeur.

1056. En employant des houilles sèches, on arriverait certainement à des résultats qui présenteraient une très-grande économie de combustible; mais il faudrait maintenir constamment la couche de combustible dans le foyer à l'épaisseur qui aurait été trouvée la plus convenable, et on devrait employer toujours le même combustible en fragments de mêmes dimensions.

1057. Pour les houilles grasses, ou du moins pour les houilles ordinaires de grilles, on n'arriverait qu'à des résultats beaucoup moins satisfaisants, parce que, dans les instants qui suivent le chargement, l'air qui a traversé la grille doit renfermer un grand excès d'oxygène pour brûler les gaz qui se dégagent, et que cet excès devrait décroître avec les progrès de la combustion. Cette différence entre les houilles sèches et les houilles grasses, qui ne permet pas d'obtenir des dernières un aussi grand effet utile, produira infailliblement, d'ici à peu de temps, un changement complet dans la différence des prix de ces deux espèces de houille.

Je rapporterai à ce sujet un résultat obtenu dans les ateliers des diligences Laffitte et Caillard, qui montre avec évidence l'économie qu'on peut obtenir en remplaçant les houilles flambantes par des houilles sèches. Il y a dans ces ateliers une machine à vapeur de 16 chevaux, dont la chaudière, chauffée avec des houilles flambantes, consommait 11 hectolitres par jour de 10 heures; on y a substitué des houilles sèches de Ham, qui sont en grande partie très-menues et d'une combustion difficile, et en activant le tirage par un jet de vapeur, la consommation a été réduite à 9 hectolitres.

Les mêmes moyens conduiraient sans aucun doute à une grande amélioration dans les foyers à bois et à tourbe; mais, comme nous l'avons déjà dit, ces améliorations ne seraient possibles que pour les foyers dans lesquels ces combustibles sont brûlés sur grilles.

1058. L'économie de combustible dont nous venons de parler ne pourrait cependant avoir lieu que pour les générateurs dont le travail est uniforme, et pour les combustibles fossiles qui ne donnent pas trop de scories; car les variations de consommation produites par le mouvement du registre, changeraient complétement les conditions de la

combustion, et les interruptions fréquentes qu'exige le nettoyage des grilles, produiraient, par les portes des foyers, des appels d'air qui feraient disparaître en grande partie les avantages d'une bonne combustion dans les intervalles. Pour les combustibles qui donnent beaucoup de résidus, leur transformation préalable en gaz combustibles serait le seul moyen d'en tirer un grand effet utile (687).

1059. La combustion ayant lieu complétement dans le foyer avec le moins d'air possible, de manière à donner à l'air brûlé la plus haute température, il faut absorber toute la chaleur qui n'est pas nécessaire au tirage. Dans un grand nombre de cas, les surfaces de chauffe sont trop petites, et l'air brûlé est abandonné dans la cheminée à une température supérieure à 300°; il en résulte, comme nous l'avons vu, et une perte de chaleur et une perte de tirage. Avec une cheminée d'une grande hauteur et d'une section suffisante, on peut facilement, en augmentant la surface de chauffe, et surtout en lui donnant une disposition convenable, abaisser la température de l'air brûlé à son entrée dans la cheminée, à 200° et même à 150°.

1060. On peut aussi, dans les appareils établis, et sans y faire de grands changements, utiliser une partie de la chaleur perdue pour chauffer à 100° l'eau d'alimentation; il suffit, pour cela, de placer une petite chaudière à la suite de la première, et d'y faire passer l'eau d'alimentation. Cette chaudière devrait avoir une surface de chauffe à peu près égale à $\frac{1}{4}$ de celle de la chaudière à vapeur; elle pourrait être annulaire et placée au bas de la cheminée. On obtiendrait le même résultat en faisant passer l'eau d'alimentation dans un tuyau qui circulerait dans les carneaux.

1061. Mais de tous les moyens qu'on pourrait employer pour utiliser le mieux possible la chaleur perdue, celui qui présente le plus d'avantage consiste à produire un tirage artificiel au moyen d'un jet de vapeur ou d'un ventilateur, et à refroidir complétement la fumée. L'appareil serait composé d'une chaudière à vapeur ayant une surface de chauffe assez considérable pour refroidir l'air brûlé à 200° , d'une cheminée de tirage et d'une partie additionnelle dans laquelle on chaufferait l'eau d'alimentation. Quand la vaporisation serait assez bien établie pour fournir la vapeur qu'exige le tirage artificiel, l'air brûlé pourrait être refroidi davantage et se rendre ensuite dans la cheminée, où il ne produirait qu'un appel insignifiant.

La chaudière devrait avoir une surface de chauffe calculée sur une production moyenne de 10 à 12 kilog. de vapeur par mètre carré et par heure. L'appareil de chauffage de l'eau devrait être formé d'un seul tube d'une grande longueur, dans lequel l'eau foulée par la pompe aurait un mouvement dirigé en sens contraire de celui de l'air brûlé, et sa surface totale devrait être un peu plus petite que la surface de chauffe de la chaudière.

1062. Par les améliorations que nous avons indiquées pour les foyers et pour les chaudières, on parviendrait sans aucun doute à doubler l'effet utile produit dans la plupart des chaudières à vapeur; car, ainsi que nous l'avons vu, la dépense de vapeur occasionnée par les différents modes de tirage artificiel est très-petite.

1063. Pour les chaudières de bateaux, il ne faudrait pas penser à utiliser complétement la chaleur développée par les dispositions dont nous venons de parler, à cause du trop petit espace dans lequel les chaudières doivent être placées; mais on augmenterait beaucoup l'effet utile produit en prenant des surfaces de chauffe correspondantes à 15 ou 20 kilog. de vapeur par mètre carré et par heure, et en modifiant les foyers comme nous l'avons indiqué précédemment. Mais ces modifications ne seraient possibles qu'en produisant un tirage artificiel, soit par un jet de vapeur quand la chaudière fonctionne à haute pression, soit par un ventilateur dans le cas contraire.

1064. Une autre amélioration non moins utile pour les bateaux à vapeur, consisterait dans une bonne disposition de chaudières; car toutes celles qui sont employées ont de graves inconvénients, ou par leur faible résistance, ou par leur poids, ou par la trop grande place qu'elles occupent, ou par la difficulté du nettoyage. Le problème est plus difficile à résoudre que pour les chaudières fixes, parce qu'il y a plus de conditions à remplir; mais il est d'une grande importance et mérite de fixer l'attention des ingénieurs. Les chaudières de M. Perkins (969) satisferaient probablement mieux à toutes les conditions exigées que les chaudières employées; à la vérité, elles seraient d'un prix plus élevé que les chaudières ordinaires, parce qu'elles renferment deux systèmes de surfaces de chauffe; mais on pourrait donner aux chaudières à vapeur des formes cylindriques qui occuperaient moins de place et seraient plus résistantes, les incrustations seraient sans influence, et, avec la même étendue de

surface de chauffe directe, on parviendrait probablement, par un arrangement convenable des tubes, à refroidir plus l'air brûlé qu'avec les dispositions ordinaires. Mais il serait important de vérifier si tous les combustibles, et principalement la houille, pourraient être employés avec autant d'avantage que le coke, dont on a exclusivement fait usage jusqu'ici pour ce mode de chauffage, et si, en augmentant la hauteur du circuit, et par suite la vitesse de circulation, il ne serait pas possible de produire le même effet utile avec une moindre étendue dans les deux systèmes de surfaces de chauffe.

1065. Quant aux générateurs des locomotives, il est peu probable qu'on puisse leur donner une disposition plus convenable. Seulement on parviendrait à leur faire produire un plus grand effet utile en augmentant l'étendue des surfaces de chauffe, et surtout en déterminant par quelques expériences la hauteur la plus convenable du combustible sur la grille. Je regarde comme bien probable que les houilles sèches d'une consistance suffisante et en fragments peu différents de ceux du coke, se comporteraient comme ce dernier combustible et produiraient une économie notable, attendu qu'à poids égal les prix du coke et des houilles sèches sont dans un rapport plus grand que celui de leurs puissances calorifiques.

FIN DU PREMIER VOLUME.

# TABLE DES MATIÈRES

## CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME.


### CHAPITRE I. PRINCIPAUX FAITS RELATIFS A LA THÉORIE PHYSIQUE DE LA CHALEUR.

§ 1. Température, thermomètres ..... 1
2. Calorique rayonnant ..... 7
3. Propagation de la chaleur à travers les corps ..... 10
4. Lois du réchauffement et du refroidissement ..... 11
5. Dilatation des corps ..... 11
6. Des vapeurs ..... 18
7. Chaleurs spécifiques ..... 28
8. Changements d'état des corps ..... 33
9. Sources de chaleur et de froid ..... 37
10. Densités ..... 39

### CHAPITRE II. DE LA COMBUSTION ET DES COMBUSTIBLES.

§ 1. De la combustion en général ..... 41
2. Des combustibles en général et des méthodes employées pour déterminer leur puissance calorifique et leur pouvoir rayonnant ..... 47
3. Des bois ..... 54
4. Charbon de bois ..... 64
5. Tannée ..... 78
6. Tourbe ..... 79
7. Charbon de tourbe ..... 83
8. Combustibles fossiles : lignites, houilles, anthracites ..... 85
9. Coke ..... 103
10. Détermination des volumes d'air nécessaires pour brûler les différents combustibles, et des volumes de gaz qui s'échappent ..... 107
11. Comparaison des différents combustibles ..... 113

### CHAPITRE III. ÉCOULEMENT DES GAZ COMPRIMÉS.

§ 1. Vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé qui s'écoule par un orifice percé en mince paroi ou par un court ajutage ..... 127

2. Vitesse d'écoulement d'un gaz comprimé lorsqu'il s'écoule par de longs tuyaux de conduite. 132
3. Appareil destiné à mesurer directement la vitesse d'écoulement d'un gaz..... 137

CHAPITRE IV, MOUVEMENTS DE L'AIR CHAUD.

§ 1. Vitesse due à la pression..... 140
2. Vitesse d'écoulement de l'air chaud dans un canal cylindrique complétement ouvert à ses deux extrémités..... 143
3. Vitesse d'écoulement de l'air chaud dans une cheminée rétrécie à la partie supérieure.. 150
4. Vitesse d'écoulement de l'air chaud dans une cheminée rétrécie à la partie inférieure.... 152
5. Mouvements de l'air dans des cheminées de différentes formes..... 159
6. Détermination de la vitesse d'écoulement de l'air dans une cheminée précédée d'un circuit d'une forme quelconque..... 161
7. Effets produits par la rencontre des courants..... 162
8. Pressions exercées par les gaz en mouvement contre les tuyaux de conduite..... 164
9. Maximum de tirage des cheminées..... 165

CHAPITRE V. DES CHEMINÉES.

§ 1. Détermination des dimensions des cheminées..... 168
2. Chaleur perdue par l'air brûlé..... 182
3. Construction des cheminées..... 184
4. Influence de l'état de l'atmosphère sur le tirage des cheminées..... 195
5. Appareils destinés à soustraire le tirage des cheminées à l'influence des vents et de la pluie. 202
6. Appareils dans lesquels le tirage a lieu avant que l'effet utile de la chaleur soit produit, ou pendant que la chaleur passe dans le corps qui doit être échauffé..... 208

CHAPITRE VI. MOUVEMENTS DE L'AIR PRODUITS PAR DES MACHINES OU PAR DES JETS DE VAPEUR.

§ 1. Comparaison des effets utiles produits directement par la chaleur et par les machines.. 211
2. Ventilateur à force centrifuge..... 215
3. Vis d'Archimède..... 233
4. Mouvement de l'air produit par une injection de vapeur..... 234

CHAPITRE VII. DES FOYERS.

§ 1. Foyers à flamme droite..... 237
2. Foyers à flamme renversée..... 247
3. Foyers intérieurs..... 248
4. Foyers fumivores..... 248
5. Foyers à injection de vapeur ou d'air..... 264
6. Foyers à houilles sèches et à anthracites..... 265
7. Foyers dans lesquels la combustion est produite par des courants d'air à grande vitesse. 274
8. Foyers à air chaud..... 275
9. Foyers à goudron..... 276
10. Foyers à gaz..... 277
11. Considérations générales sur les foyers..... 279

CHAPITRE VIII. TRANSMISSION DE LA CHALEUR ..... 284

CHAPITRE IX. VAPORISATION ..... 296

§ 1. Des chaudières ..... 298
2. Indicateurs ..... 317
3. Manomètres. ..... 325
4. Soupapes de sûreté ..... 336
5. Thermomètres, plaques fusibles, plaques élastiques ..... 351
6. Appareils d'alimentation ..... 359
7. Appareils pour séparer de la vapeur l'eau qu'elle entraîne ..... 373
8. Tuyaux d'écoulement de la vapeur ..... 376
9. Fourneaux ..... 379
10. Règlements relatifs aux chaudières à vapeur ..... 386
11. Conduite de l'opération ..... 388
12. Différentes dispositions des chaudières à vapeur ..... 397
13. Chaudières chauffées par la chaleur perdue de l'air brûlé ou des gaz combustibles qu'il renferme ..... 422
14. Explosions des chaudières à vapeur ..... 431
15. Améliorations dont les chaudières à vapeur sont susceptibles ..... 448

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME.

This book should be returned to the Library on or before the last date stamped below.

A fine of five cents a day is incurred by retaining it beyond the specified time.

Please return promptly.

Eng 2698.43
Traite de la chaleur consideree
Cabot Science 006281780
3 2044 091 880 138